

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT
A DÍLCŮ**

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**VÝVOJ TEPELNĚ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ
NA BÁZI ODPADNÍCH TEXTILNÍCH VLÁKEN**

DEVELOPMENT OF THERMAL INSULATING MATERIALS BASED ON WASTE
TEXTILE FIBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavlína Přikrylová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
PRACOVISTĚ	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Pavlína Přikrylová
NÁZEV	Vývoj tepelně izolačních materiálů na bázi odpadních textilních vláken
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	Ing. Jiří Zach, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA

Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA

Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] CHYBÍK, J. Přírodní stavební materiály. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2009. 272 s. ISBN 978-80-247-2532-1.
- [2] ŠTASTNÍK, S., ZACH, J. Zkoušení izolačních materiálů. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 95 s. ISBN 80-214-2253-X
- [3] ŠTASTNÍK, S., ZACH, J., Stavební akustika a zvukoizolační materiály. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 209 s. ISBN 80-214-2117-7.
- [4] Briga-Sá, A., Nascimento, D., Teixeira, N., Pinto, J., Caldeira, F., Varum, H., Paiva, A., Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution, Construction and Building Materials, Volume 38, January 2013, Pages 155-160, ISSN 0950-061
- [5] Hadded, A., Benltoufa, S., Fayala, F., Jemni, A., Thermo physical characterisation of recycled textile materials used for building insulating, Journal of Building Engineering, Volume 5, March 2016, Pages 34-40, ISSN 2352-7102

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Diplomová práce se bude věnovat možnostem vývoje tepelně a akusticko izolačních materiálů z textilních vláken. Cílem práce bude navrhnout vhodný zdroj textilních vláken, pocházejících například z vyřazeného textilu nebo vznikajících jako odpad v textilní výrobě apod., které by bylo možné využít pro výrobu tepelných izolací s co nejlepšími tepelně izolačními vlastnostmi. V rámci práce bude proveden výběr potenciálně vhodných surovin, návrh technologie výroby izolačních rohoží a provedení ověřovacích měření na prototypových vzorcích izolantů. Bude se jednat především o stanovení součinitele tepelné vodivosti (ve vysušeném stavu i v závislosti na vlhkosti), mechanických vlastností (napětí při 10% deformaci a pevnosti v tahu kolmo k rovině desky) a akustických vlastností (zvukové pohltivosti a dynamické tuhosti). Součástí práce bude i ekonomické vyhodnocení.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

Ing. Jiří Zach, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Vzrůstající množství odpadů představuje vážný environmentální, sociální a ekonomický problém. Odpady vznikají v průmyslu i domácnostech. Velká část hospodářství při své výrobě přeměňuje určité množství vstupních surovin na odpad, proto je současné době kladen důraz na hledání udržitelných zdrojů surovin. Jednou z vhodných druhotných surovin může být vyřazený textil nebo odpad z textilního průmyslu. Tyto druhy textilních odpadů často končí na skládkách nebo ve spalovnách, proto je z ekologického i environmentálního hlediska výhodné jejich další použití. Diplomová práce se zabývá studiem a vývojem tepelně i akusticko izolačních materiálů na bázi textilních vláken. Zaměřuje se na legislativní požadavky o nakládání s odpady, na rozdělení textilních odpadů a na jejich následné úpravy před dalším použitím. Dále obsahuje druhy textilních vláken a technologie pojení tepelně i akusticko izolačních materiálů. Na závěr je provedeno zhodnocení tepelně izolačních, akustických a mechanických vlastností vláknitých izolačních materiálů.

KLÍČOVÁ SLOVA

tepelná izolace, akustická izolace, vláknité izolační materiály, textilní odpad, tepelně izolační a akustické vlastnosti, textilní vlákna

ABSTRACT

The increasing quantity of waste represents serious environmental, social and economic problem. Wastes produced from industry and households. A large part of the economy transforms a certain amount of raw materials to waste in their production, because it is currently emphasis is placed on finding sustainable sources of raw materials. One of the suitable secondary raw materials can be discarded textiles or waste from the textile industry. These kinds of textile waste often ends up in landfills or incinerators, so it is from an ecological and environmentally advantageous to their further use. The diploma thesis deals with the study and development of thermal and acoustic insulation materials based on textile fibers. It focuses on the legislative requirements for waste management for the sorting of textile wastes and their subsequent modification before reuse. Further it contains kinds of textile fibers and bonding technologies thermal and acoustic insulation materials. Finally, an evaluation of thermal insulation, acoustic and mechanical properties of fibrous insulation materials.

KEYWORDS

thermal insulation, acoustic insulation, fibrous insulating materials, textile waste, thermal insulation and acoustic properties, textile fibres

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Pavlína Přikrylová *Vývoj tepelně izolačních materiálů na bázi odpadních textilních vláken*. Brno, 2017. 88 s., 93 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jiří Zach, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2017

Bc. Pavlína Přikrylová
autor práce

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D. za kvalitní vedení mé diplomové práce a odborný dohled. Dále děkuji za pomoc při zpracování praktické části Ing. Jitce Hroudové a Ing. Vítězslavovi Novákovi. Rovněž děkuji společnosti Retex, a.s. za poskytnutí materiálů ke studiu vlastností.

Tato diplomová práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

OBSAH

I.	ÚVOD.....	10
II.	TEORETICKÁ ČÁST	12
1	Problematika vzniku odpadů	12
2	Druhy textilních odpadů	14
2.1	Sběrové tříděné odpady	14
2.2	Průmyslové odpady.....	15
2.2.1	Odpady z matrací a automobilového průmyslu	15
2.2.2	Odpady z textilního průmyslu	16
2.2.3	Odpady při výrobě netkaných textilií	16
2.2.4	Odpadní bavlna.....	17
2.3	Netříděné odpady	17
3	Úprava textilních odpadů.....	18
3.1	Třídění.....	18
3.2	Čištění	18
3.3	Úpravy a balení textilních materiálů.....	19
4	Druhy vláken vhodné pro výrobu izolačních materiálů	20
4.1	Rostlinná vlákna	20
4.1.1	Bavlněná vlákna	20
4.1.2	Jutová vlákna	21
4.1.3	Konopná vlákna.....	22
4.1.4	Lněná vlákna.....	22
4.2	Živočišná vlákna	23
4.2.1	Vlněná vlákna	23
4.3	Chemická vlákna.....	24
4.3.1	Chemická vlákna z přírodních polymerů.....	24
4.3.2	Chemická vlákna ze syntetických polymerů	26
5	Technologie pojení tepelně izolačních rohoží	30
5.1	Mechanické pojení	30
5.1.1	Technologie vpichování	30

5.1.2	Technologie zpevňování paprsky vody	31
5.1.3	Technologie proplétání	32
5.2	Chemické pojení	32
5.3	Termické pojení	33
5.3.1	Teplovzdušné pojení s využitím technologie Air-lay	33
5.3.2	Technologie Struto	34
6	Tepelně a akusticko izolační materiály	35
6.1	Požadavky tepelně izolační	37
6.1.1	Součinitel tepelné vodivosti	37
6.2	Požadavky akustické	39
6.2.1	Zvuková pohltivost	40
6.2.2	Dynamická tuhost	41
6.3	Mechanické vlastnosti	41
6.3.1	Pevnost v tahu kolmo k rovině desky	41
6.3.2	Pevnost v tlaku (napětí při 10% deformaci)	41
III.	PRAKTICKÁ ČÁST	42
7	CÍL PRÁCE	42
8	METODIKA PRÁCE	43
9	ZKUŠEBNÍ VZORKY	44
10	ZKUŠEBNÍ METODY	45
10.1	Stanovení tloušťky a lineárních rozměrů vzorků	45
10.2	Stanovení objemové hmotnosti	46
10.3	Stanovení součinitele tepelné vodivosti	47
10.4	Stanovení sorpčních vlastností	48
10.5	Stanovení činitele zvukové pohltivosti	49
10.6	Stanovení dynamické tuhosti	50
10.7	Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky	53
10.8	Stanovení napětí při 10% deformaci	54
10.9	Multikriteriální hodnocení	55

11	VÝSLEDKY ZKOUŠEK	57
11.1	Stanovení tloušťky	57
11.2	Stanovení objemové hmotnosti	60
11.3	Stanovení součinitele tepelné vodivosti a sorpčních vlastností	63
11.4	Stanovení činitele zvukové pohltivosti	65
11.5	Stanovení dynamické tuhosti	66
11.6	Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky	67
11.7	Stanovení pevnosti v tlaku (napětí při 10% deformaci)	68
11.8	Ekonomické zhodnocení	70
11.9	Multikriteriální hodnocení	72
12	Diskuze výsledků	74
13	Závěr	79
14	Použitá literatura	82
15	Seznam příloh	87
15.1	Seznam obrázků	87
15.2	Seznam tabulek	87
15.3	Seznam grafů	88
16	Přílohy	89

I. ÚVOD

Vzhledem k vysoké spotřebě energie, změnám klimatu a vzácnosti přírodních zdrojů je potřeba zabývat se udržitelnými zdroji surovin. Jednou z možností je využití odpadů. Jejich zvyšující se množství představuje naléhavý environmentální, sociální a ekonomický problém. Odpad vzniká především při průmyslové výrobě. Stavebnictví je oblastí zpracovávající některé druhy odpadů např. vysokopeční strusku, popílek, mikrosiliku atd. Uplatnění zde nachází i textilní materiály, díky rostoucí výrobě syntetických vláken. V odvětví stavebnictví se používají již po desetiletí. Využívá se rovněž přírodních zdrojů především bavlny, vlny, lnu, konopí apod.

Vhodnými druhotnými surovinami pro výrobu tepelně izolačních materiálů se jeví textilní materiály. Primární funkcí oděvu je totiž chránit lidské tělo před chladem a teplem s cílem udržení určitého teplotního komfortu pro člověka. [1] V podstatě zabraňuje přenosu tepla mezi lidským tělem a vnějším prostředím. Z tohoto důvodu je vhodné textilní materiály použít k zateplení budov. Kvalitní tepelná izolace může zachránit asi 65 % spotřeby energie v domácnosti. [2] Jejich úkolem je tepelná ochrana budov. Při zabudování do konstrukce zabraňují přenosu tepelné energie z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou. Slouží ke snižování tepelných ztrát v zimě a pro zamezení pronikání tepla do budovy v letním období.

Mnoho druhů textilních odpadů často končí na skládkách nebo ve spalovnách, proto je z ekologického i environmentálního hlediska výhodné jejich další použití. Část pochází jako odpad z textilního průmyslu nebo z vyřazeného oblečení. Jednotlivé zdroje textilních materiálů se liší v závislosti na odvětví, ve kterém vznikly. Získávají se ve formě oděvů, tkanin a nití. Diference se projevují zvláště v materiálových vlastnostech, jako jsou chemické složení, struktura a velikosti vláken. Ve velké míře je tvoří bavlna, vlna, hedvábí, polyester, akryl a další materiály. Další rozdíly lze pozorovat v struktuře závislé na uspořádání vláken. Vzhledem k tomu, že se může jednat o různorodý textilní odpad, je třeba brát zřetel na všechny důležité vlastnosti a charakteristiky. Každý zdroj textilního odpadu musí být důkladně prostudován, jestli je vhodný pro danou aplikaci. [1]

Diplomová práce se zabývá možnostmi vývoje tepelně i akusticko izolačních materiálů na bázi textilních vláken. Cílem je návrh vhodného zdroje textilních vláken například z vyřazeného textilu nebo odpadu při textilní výrobě. Teoretická část práce obsahuje legislativní požadavky týkající se nakládání s odpady a rozdělení textilních odpadů. Popisuje další úpravy textilních odpadů před zakomponováním do určité technologie zpracování. Další část rozebírá druhy textilních vláken vhodné pro výrobu vláknitých izolací. Práce se věnuje i možnostem výroby materiálů, aby dosáhly co nejlepších tepelně i zvukově izolačních vlastností. Shrnuje požadavky tepelně izolační, akustické i mechanické. Hlavním úkolem experimentální části je výběr potenciálně vhodných surovin, návrh technologie výroby izolačních rohoží a provedení ověřovacích měření na prototypových vzorcích izolantů. Tepelně izolační, akustické a mechanické vlastnosti vláknitých izolantů jsou ověřeny pomocí řady zkoušek. Součástí je rovněž ekonomické zhodnocení a multikriteriální hodnocení sloužící k snadnějšímu srovnání zkoumaných tepelně i akusticko izolačních materiálů.

II. TEORETICKÁ ČÁST

1 Problematika vzniku odpadů

Vzrůstající množství odpadů představuje naléhavý environmentální, sociální a ekonomický problém. Odpadní materiály vznikají při výrobní i nevýrobní činnosti. Velká část hospodářství se zabývá právě přeměnou surovin na odpad. Vznik odpadů může být také důsledkem neefektivního využívání primárních zdrojů. Některé závody se snaží zakomponovat odpad zpět do výroby tak, aby ani nevznikl. Toto řešení se nazývá bezodpadová technologie. Jiná výrobní zařízení usilují spíše o jejich zpracování, a zároveň o vytvoření vedlejších produktů. Takovými způsoby lze snížit množství odpadů a získat cenné zdroje surovin, kterých je v přírodě nedostatek. Nesprávné nakládání s odpady může totiž vést nejen k vypouštění emisí do ovzduší, vody a půdy, ale i nadměrné produkci hluku. [3][4]

V zemích Evropské unie je ročně vyřazeno kolem 5,8 milionu tun textilních materiálů právě ze strany spotřebitelů. Z toho pouze 25 % textilu je recyklováno průmyslovými podniky a darováno charitě. Zbývající odpad putuje přímo na skládku nebo do spaloven komunálního odpadu. Z této skutečnosti vyplývá, že se jedná o materiál, který nikdo nepoužívá a původci se ho snaží zbavit. Tím představuje obrovský zdroj druhotných surovin, které by bylo možné v budoucnu zavést na trh a následně využít. Jelikož se stále jedná o velké množství odpadu, je potřeba zabývat se ochranou životního prostředí. Především zabránit skládkování a spalování textilií. Za účelem podpory recyklace se uvedenou problematikou zabývá evropská legislativa. [1]

Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008, o odpadech uvádí základní principy nakládání s odpady v EU, jejich recyklaci a snahu o snížení produkce odpadů. Je založena na „hierarchii nakládání s odpady“, která stanovuje pořadí priorit při tvorbě politiky v oblasti odpadů a nakládání s nimi: prevence, opětovné použití, recyklace, regenerace a likvidace zahrnující skládkování, a nakonec nejméně preferované spalování bez získání energie. Směrnice vyžaduje, aby členské státy EU do roku 2020 zvýšily podíl recyklace na zpracování odpadu z domácností a podobných odpadů na 50 %. Do roku 2020 by v oblasti stavebnictví mělo být recyklováno alespoň 70 % stavebních a demoličních

živnostenských a průmyslových odpadů. Česká republika se snaží těmto cílům přiblížit. Proto Ministerstvo životního prostředí v posledních letech pracovalo na novelizaci zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů (dále jen „**Zákon o odpadech**“), konkrétně na zákonu č. 223/2015 Sb., změna zákona o odpadech a změna zákona č. 169/2013 Sb. [5][6][7]

Zákon o odpadech se nyní přizpůsobil evropské legislativě. Evropská unie totiž usiluje o zlepšení situace v členských státech, které mají zaostalé odpadové hospodářství. Toho se snaží docílit také pomocí ekonomických ukazatelů, např. daně za skládkování, poplatky za odpad pro občany, tlak na výrobce, aby přijímali zboží po skončení jeho životnosti apod. [4]

V České republice problematiku řeší právě odpadové hospodářství. Zaměřuje se na předcházení vzniku odpadů, na nakládání s odpady a o následnou péči o místa uložení odpadů. Základní pojmy v oblasti odpadového hospodářství jsou shrnuty v zákoně o odpadech. Odpad je zde definován jako každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit a přísluší do některé ze skupin odpadů uvedené v příloze č. 1 k tomuto zákonu. Zařazení odpadů do příslušných kategorií je upraveno ve vyhlášce č. 93/2016 Sb. o katalogu odpadů. Hodnocením nebezpečnosti odpadů se zase věnuje vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 94/2016 Sb. o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů. Ukládá povinnosti při nakládání s odpady: při jejich obchodování, shromažďování, sběru, výkupu, přepravě, skladování, úpravě, využití a odstranění. V zákoně o odpadech je popsán zpětný odběr vybraných výrobků např. oleje, pneumatiky, elektrozařízení z domácností apod. Stanovuje zvláštní pravidla pro nakládání s vybranými druhy odpadů např. baterie, autovraky, elektrická a elektronická zařízení atd. Rovněž řeší evidenci a ohlašování odpadů a pravomoci jednotlivých úřadů, plánování, kontrolu a vymahatelnost. [8]

2 Druhy textilních odpadů

Textilními odpady se souhrnně nazývají průmyslové textilní odpady a sběrové textilie. [9] Průmyslové odpadní materiály se získávají především z textilního průmyslu při výrobě oděvů a ostatních textilií. Jedná se tedy o odpady vzniklé již v počátku výrobního cyklu. Naopak použité nebo nevhodné oděvy se ukládají do sběrných kontejnerů. Bohužel navzdory četnému počtu kontejnerů, končí část z odpadních textilií v netříděném tedy komunálním odpadu.

2.1 Sběrové tříděné odpady

Dle zákona o odpadech je tříděný sběr definován jako tok odpadů oddělený podle druhu, kategorie a charakteru odpadu s cílem usnadnit specifické zpracování. [8] Tímto způsobem lze omezit skládkování nebo spalování veškerého starého textilu v kamnech spousty domácností. Navíc lze pomocí třídění a následné recyklace získat značné zdroje druhotných surovin pro další výrobu nebo užití. Proto se v současné době objevuje na území obcí a měst stále více kontejnerů určených ke sběru textilních odpadů. Do kontejnerů patří např. oblečení, obuv, plyšové hračky, přikrývky, utěrky, záclony, peněženky, kabelky, opasky atd. Jednou z podmínek pro umístění starého textilu do kontejnerů je čistota a zabalení do igelitových pytlů. [10]

Sběrové textilní odpady se získávají nejen z kontejnerů, ale také ze sběrných dvorů. Některé zachovalé oblečení se opětovně využívá, buď jej vykoupí bazary či second-handy nebo putuje k charitativním organizacím. Nepoužitelné materiály se spalují nebo skládkují, ale ve velké míře dochází k recyklaci textilu. Nejedná se však o stejnorodé materiály, proto se musí ještě roztřídit:

1. podle materiálu: syntetické, celulózové, vlněné,
2. podle pevnosti a podle barvy: tkanina (pevná světlá, střední světlá, pevná tmavá, střední tmavá), pletenina (světlá, tmavá). [10]

Na třídící lince se odstraní nevhodné textilie a netextilní materiály, jako jsou například knoflíky, spony, zipy apod. Pomocí speciálních páracích nožů se textil natrhá. Vzniká různobarevná směs textilních vláken, která se může použít jako izolační materiál pro vodovodní potrubí nebo jako vstupní surovina pro výrobu izolačních desek. Dále ve stavebnictví také při výrobě lepenky. Využívá se i v jiných průmyslových odvětvích.

Třeba v oblasti dopravy k výplni sedaček automobilů a letadel. Z recyklovaného textilu se vyrábí rovněž čistící hadry, prachovky, ale také zátěžové koberce. [10][12]

2.2 Průmyslové odpady

Jedná se o odpady vznikající v textilní a plastikářském průmyslu. Pocházejí především z přádelen, tkalcoven, pletáren, úpraven a dále z oděvní a jiné výroby. Při výrobě nového oblečení dochází k zatěžování životního prostředí, jehož nedílnou součástí je produkce odpadů. Největší část tvoří právě odpady z textilií, které dále můžeme třídit takto:

1. vlákna: podle materiálu, jemnosti, délky,
2. nitě: podle materiálu, formy (jednoduché, tkané atd.), povrchové úpravy,
3. odstřížky: podle materiálu, pevnosti, barvy (světlé, tmavé). [10]

Množství průmyslových textilních odpadů závisí na druhu textilních vláken. Pokud se jedná o přírodní materiály, množství je několikanásobně menší než u textilií syntetických. Odpady se často používají jako druhotná surovina. Rozdělují se na vratné a nevratné. Vratné se používají do stejných produktů, při kterých vznikly. Naopak nevratné se zakomponují do jiných produktů. Odpady jsou recyklovány rozvlákňováním a dalšími úpravami. Vyrábí se z nich pak netkané textilie, lepenky, plsti atd. [12][13]

2.2.1 Odpady z matrací a automobilového průmyslu

V Portugalsku byla v roce 2011 provedena studie o možnosti použití textilního odpadu z výplně matrací ve stavebnictví jako tepelně izolační materiál. Na severu Portugalska, zejména v oblasti Duoro Litoral, je textilní průmysl velmi rozšířen. S tím souvisí vznik velkého množství textilního odpadu. Ekonomickou výhodou odpadu je poměrně nízká cena, tudíž se používá i v jiných odvětvích průmyslu, na tomto území především k výplni matrací a v automobilovém průmyslu. Směsi vláken se skládají převážně z akrylu, vlny a bavlny. Tloušťky akrylových vláken se pohybují mezi 8-15 μm .

Pro zjištění tepelně izolačních vlastností odpadního materiálu byl použit jako tepelná izolace dvojité obvodové stěny. Měření bylo realizováno in situ ve zkušební místnosti o rozměrech 4 x 3 x 2,54 m. Místnost byla vyzděna z betonových tvárnic a keramické cihlové zdi. Mezi betonovou a cihlovou zdí byla vytvořena mezera 6 cm na vyplnění textilním odpadem. Přenos tepla byl měřen pomocí dvou teplotních senzorů a čtyř povrchových teplotních čidel. Vyhodnocení bylo provedeno převedením naměřených dat do počítače.

Na základě studie bylo prokázáno, že se jedná o potenciálně perspektivní zdroj vláken. Součinitel prostupu tepla byl naměřen $0,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Což je o 33 % nižší hodnota součinitele prostupu tepla, než bez výplně textilním odpadem jako izolace ($0,42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). Na základě provedeného výzkumu byly zjištěny velmi dobré tepelně izolační vlastnosti. Využití tohoto průmyslového odpadu je tedy vhodné pro nejrůznější aplikace ve stavebnictví i jako tepelně izolační materiál. [14]

2.2.2 Odpady z textilního průmyslu

Oděvy, tkaniny a nitě jsou nejčastějšími druhy odpadů z textilního průmyslu. Liší se především ve složení, struktuře, tloušťce a délce vláken. Textilní materiály se v největší míře skládají z bavlny, vlny, lnu, hedvábí a akrylu. V roce 2013 byl proveden další výzkum opět v severní části Portugalska, kde převládá textilní průmysl spojený s velkým množstvím odpadu.

V rámci studie byly použity 100% akrylová vlákna ve formě odpadu z tkaného a rozvlákněného textilu. Objemová hmotnost tkaného textilního odpadu byla $440 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a rozvlákněného $122,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Tyto dva druhy odpadů byly zakomponovány do konstrukce dvojité vnější stěny jako alternativní tepelná izolace (postup měření popsán v kap. 2.2.1). V případě tkaného textilního odpadu byl zjištěn součinitel tepelné vodivosti $0,044 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a u vlákněného odpadu $0,103 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Z naměřených výsledků vyplývá, že tkané textilie mají lepší tepelně izolační vlastnosti než nezpevněný vlákněný odpad. Nezpevněný vlákněný odpad se přibližuje hodnotou součinitele tepelné vodivosti materiálům na bázi granulí jílu, vermikulitu a expandovaného perlitu. Na druhé straně však tkané textilie jsou podobné známým tepelně izolačním materiálům, jako extrudovaný polystyren, pěnový polystyren a minerální vlna. [1]

2.2.3 Odpady při výrobě netkaných textilií

Odpady při výrobě netkaných textilií vznikají rozvláknováním a míchaním vláken, ale také řezáním rohoží. Jedná se o směs vláken o různém složení, délce a tloušťce vláken. Při výrobě netkaných textilií se používá tzv. bezodpadová výroba. Lze totiž vzniklý odpad po očištění vrátit zpět do výroby (viz. kap. 5) a tím minimalizovat množství celkového odpadu. Druhou možností je použít vlákna v jiném procesu, např. k výrobě tepelně izolačních materiálů.

V rámci studie v roce 2015 byly zkoumány zbytky vláken z řezných mlýnů a rohože nařezány řezacími stoly. Na základě provedených zkoušek bylo zjištěno, že textilní odpady dosahují lepších tepelně izolačních vlastností než známé izolanty. Vláknenná rohož dosáhla součinitele tepelné vodivosti $0,033 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a nezpevněná vláknenná směs $0,039 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. [2]

2.2.4 Odpadní bavlna

Při pěstování bavlny se používá značné množství pesticidů a chemikálií, což má negativní vliv na životní prostředí. V případě pěstování bio bavlny se jim lze vyhnout, nadále je však nutné použití barvení apod. Naopak při použití recyklované bavlny tyto kroky odpadají, navíc se snižují jak náklady na odstranění, tak i elektrická spotřeba při pěstování.

Textilní odpady na bázi bavlny se rozřežou na malé kousky a rozvlákňují se. Získaná vlákna mají délku 10-15 mm. Rozvlákněná bavlněná vlákna se pak míchají s vlákny syntetickými, např. polyesterovými, akrylovými. Dále pak nacházejí využití v textilním nebo jiném průmyslu. [15]

2.3 Netříděné odpady

Z hlediska životního prostředí a ekologie představuje netříděný odpad problém, který se prozatím pouze odsouvá. Řešit jej však budou muset budoucí generace. Ve smyslu zákona o odpadech je netříděným komunálním odpadem veškerý odpad vznikající na území obce po vytrídění. [8] Jedná se tedy o tzv. „zbytkový“ odpad, který končí na skládkách nebo ve spalovnách.

Součástí netříděných odpadů jsou i ty odpady, které lze vytrídit prostřednictvím sběrů. Pomocí třídění se snižuje celkové množství nevyužitelného komunálního odpadu. Především je pak možné odpad vrátit zpět do výroby či recyklovat. Z každého produktu lze využít alespoň některé části, které se mohou dále zpracovávat případně i ve formě druhotných surovin. Pokud se textilní odpad, který lze třídit, objeví v popelnici na komunální odpad, skončí pravděpodobně na skládce. Textilní materiály, které jsou součástí netříděných odpadů, nelze ve většině případů použít pro další zpracování. [16]

3 Úprava textilních odpadů

Textilní odpady získané ze sběrových tříděných nebo průmyslových odpadů je nutné dále upravovat. V první fázi je nutné je roztřídit dle materiálů a velikostí. Následuje mechanické čištění nebo praní textilií a různé úpravy v závislosti na dalším použití. Na závěr jsou textilie zabaleny a expedovány k dalšímu zpracovateli.

3.1 Třídění

V první fázi dochází k oddělování odpadů, aby se nepomíchaly různé druhy textilních materiálů (odstřížky, nitě, vlákna). Dále se roztřídí dle materiálového složení, fyzikálně mechanických vlastností, barvy a dalších kritérií v závislosti na následovném použití odpadního materiálu. V případě sběrových textilií je prvním procesem tzv. páráni a oddělování lepených a prošívaných spojů nebo netextilních materiálů (knoflíky, zipy). Třídění může probíhat jednofázově nebo vícefázově na třídících stolech nebo pásích. U sběrových odpadů jsou často třídící stoly s řezacím zařízením (okružní nůž, pásová pila) k rozpárání textilií. [10]

3.2 Čištění

Dalším krokem je čištění textilních odpadů. V jejich struktuře se objevuje značné množství znečišťujících příměsí. Mohou obsahovat zbytky rostlinných částí, prach, písek, zbytky mýdel a mastných látek. Odstranění uvedených nečistot se provádí mechanicky nebo praním.

K mechanickému čištění se používá stroj, který materiál proklepává. Zároveň se uvolňují a oddělují hrubé znečišťující příměši pomocí roštů nebo sít. Jemné nečistoty se pak odvádějí pneumaticky třeba ventilátorem. Tímto způsobem však nedojde k odstranění znečištění mastnými látkami a barvami. Z tohoto důvodu se odpady čistí ještě praním. Způsob praní závisí na druhu materiálu, stupni a množství znečištění. [10]

3.3 Úpravy a balení textilních materiálů

Jedním z dalších kroků může být odbarvování. Postup se odvíjí od druhu vláken, fyzikálně mechanických vlastností a vlastností použitých barviv. Odbarvování nemusí být součástí úpravy vláken, jelikož některé technologie zpracování textilního odpadu nekladou důraz na estetické vlastnosti materiálu. V neposlední řadě se jedná o finančně nákladnější a náročnější proces.

Před balením a expedicí je potřeba ze získaného materiálu vytvořit tzv. trhaninu. Toho docílíme rozvlákněním textilu pomocí trhacích a rozvlákňovacích strojů. Vzniká směs vláken, nití, kousků látek. Na balení takto vzniklého produktu se používají hydraulické balící lisy. [10]

4 Druhy vláken vhodné pro výrobu izolačních materiálů

Tepelně izolační materiály na bázi vláken lze vyrábět z přírodních i umělých vláken. V rámci přírodních materiálů se používají vlákna rostlinného i živočišného původu. Umělá vlákna se pak rozlišují v závislosti na polymeru, ze kterého byly získány. Dělí se na přírodní a syntetické. Jednotlivá vlákna se liší materiálovými, mechanickými vlastnostmi apod. Materiálové charakteristiky jsou zastoupeny složením, tvarem, délkou a tloušťkou. Mechanické vlastnosti zahrnují pevnost, pružnost a tažnost. Dalšími sledovanými vlastnostmi jsou tepelná vodivost, trvanlivost, odolnost proti chemickým látkám, stálost na světle, chování za zvyšující se teploty atd.

4.1 Rostlinná vlákna

Přírodní rostlinná vlákna obsahují vysoké procento celulózy, protože tvoří buněčné stěny rostlinných buněk. Nejčistší zdroj celulózy představuje bavlna. U ostatních materiálů je nižší obsah celulózy. Rostlinná vlákna se liší mechanickými vlastnostmi, odolností proti ohni, vlhkosti, pevnostmi, tloušťkami, délkami vláken apod. Jejich vlastnosti se také odvíjejí podle toho, z které části rostliny pocházejí. Rostlinná vlákna lze získat:

- ze semen – bavlna, kapok,
- ze stonků – len, konopí, juta,
- z listů – sisal, manilské konopí, novozélandský len. [17]

4.1.1 Bavlněná vlákna

Bavlněná vlákna se získávají z rostliny zvané bavlník. Jedná se o nejvýznamnější přírodní vlákna, právě kvůli vysokému obsahu celulózy. Bavlna je jejím nejčistším zdrojem, protože procentuální podíl celulózy může být více než 94 %. Pěstuje se nejčastěji na plantážích ve střední Asii, východní Africe a v Evropě především v Řecku. [18] Bavlníků (*Gossypium*) existuje více než 40 druhů, avšak používá se převážně jen 5 druhů: bavlník keřovitý, srstnatý, bylinný, peruánský a stromový. Keře bavlníků dosahují výšky až 6 m a vlákna délky okolo 50 mm.[17][18]

Nejrozšířenější je dvouletý keř **bavlník srstnatý (*Gossypium hirsutum*)**. Tento zelenosemenný bavlník se vyznačuje světle žlutými až bílými květy. Jeho hlavní výhodou je značná odolnost proti degradaci a velká výnosnost bavlněných vláken. Původně pochází z Mexika, ale nyní se pěstuje po celém světě. Délka vláken se pohybuje mezi 25-35 mm a tloušťka 12-17 μm . Mezi další zástupce patří jednoletý **bavlník barbadoský (*Gossypium barbadense*)**. Dosahuje vyšších délek vláken než bavlník srstnatý 26-65 mm a menších tloušťek jednotlivých vláken 10-15 μm . Sea Island je nejznámější a nejdražší varianta tohoto bavlníku. Významný je právě kvůli délce vláken 36-66 mm. Ostatní bavlníky jako **stromový (*Gossypium arboreum*)**, **bylinný (*Gossypium herbaceum*)** a **peruánský (*Gossypium peruvianum*)** mají vlákna dlouhá 25-38 mm. [17]

Ve styku s ohněm při teplotě 120°C bavlněná vlákna zvolna žloutnou, při 150°C už hnědnou, 210°C je bod hoření a při 400°C samovolně vzplanou. Neodolávají rovněž dlouhodobému působení slunečního záření, postupně žloutnou a ztrácí pevnost. Jsou charakteristické špatnou chemickou odolností. Naopak vynikají dobrými elektroizolačními a tepelně izolačními vlastnostmi. [18]

4.1.2 Jutová vlákna

Juta (*Corchorum capsularis*) obsadila druhé místo v produkci přírodních vláken na světě za bavlnou, která se umístila na prvním místě. Juta je jednoletá tropická rostlina. Pěstuje se ve vlhkých tropických klatech v Číně, Egyptě a Indii. Nejvhodnější podmínky pro pěstování juty jsou teplota 20-40°C, relativní vlhkost 70 % a množství srážek 5-8 cm za týden. [18]

Jutová vlákna jsou tvořena cca 64 % celulózy a obsahují lignin. Získávají se z juty máčením a loupáním lýka ručně noží. Vlákna patří mezi méně pevná a tuhá vlákna. Jejich nevýhodou je poměrně velká navlhavost až 34 % a degradace za vlhka a tepla. [18] Naopak výborně odolávají proti mikroorganismům. Kvalitní jutová vlákna jsou charakteristická bílou, nažloutlou a šedou barvou. Méně kvalitní mají barvu tmavohnědou, v tomto případě je nutné počítat s možnou degradací a následně se snížením pevnosti. Technická vlákna jsou dlouhá 150-400 cm a elementární 1-5 mm s tloušťkou 15 - 20 μm . Účinkem světla, tepla a vlhka se uvolňují elementární vlákna, což se projevuje prášením. [17]

4.1.3 Konopná vlákna

Konopí seté (*Canabis sativa*) je jednoletá rostlina vzniklá z konopí divokého. Mezi další druhy patří **konopí seté severské, seté středněruské, seté jižní, hašíšné** atd. [18]

Vlákna se získávají ze stonku. Strukturou jsou podobná lněným, ale jsou pevnější, tmavší a hrubější. Barvu mají stříbrnošedou v horší kvalitě hnědou. Délka technického vlákna je 1-2 m a elementárního 4 – 55 mm. Tloušťka elementárních vláken se pohybuje mezi 14 – 17 μm , u technického vlákna až 50 μm . Ze všech přírodních materiálů jsou nejvíce odolné vůči povětrnostním podmínkám. [17]

4.1.4 Lněná vlákna

Len je jednodomá rostlina, jejíž počátky pěstování sahají až do mladší doby kamenné. **Len přadný (*Linum usitatissimum*)** se pěstuje v Asii, Americe i v Evropě na území ČR. Jeho stonky jsou 90-130 cm dlouhé. [18]

V první fázi je potřeba oddělit zdřevnatělé části od technických vláken máčením, rosením, lámáním a potíráním (odstranění dřevoviny). Při valchování se oddělí lněná a koudelová příze, ale také další části např. pazdeří se využívá k výrobě deskových stavebních materiálů. Vlákna získají barvu dle způsobu výroby. Mohou být světle žluté až bílé. Jsou hladká, lesklá, ale málo pružná a silně navlhavá. Po zpracování se získává technické vlákno dlouhé až 1 m. Technická vlákna se pak skládají z vláken elementárních o tloušťkách 15 – 40 μm . Tloušťky jsou v případě technického 600 μm a elementárního 12 - 17 μm . Do teploty 120°C jsou vlákna odolná, při dalším zvyšování teploty ztrácejí barvu. Za dlouhodobého působení slunečního záření dochází ke ztrátě jejich pevnosti. [17]

4.2 Živočišná vlákna

Živočišná vlákna jsou, na rozdíl od rostlinných celulóзовých vláken, na bázi bílkovin. Získávají se ze srsti zvířat nebo ze sekretu hmyzu. V prvním případě se jedná o vlákna keratinová např. ovčí vlna, srsti zvířat, lidské vlasy apod. Vlákna z fibroinu (i ze sericinu v případě bource morušového) pocházejí ze sekretu hmyzu. Hlavními zástupci jsou přírodní pravé hedvábí, plané hedvábí či pavoučí hedvábí. Pro vývoj tepelně izolačních materiálů se jeví jako vhodný zdroj keratinová vlákna ovčí vlny.

4.2.1 Vlněná vlákna

Vlněná vlákna se získávají stříháním srsti ovcí. Nejvýznamnějšími druhy jsou merinové, kříženecké, anglické a nížinné ovčí vlny. **Merinové** se nacházejí především v oblasti Austrálie, Nového Zélandu a Jižní Afriky. Jemnost vláken bývá pod 24 μm . Na území Nového Zélandu a Austrálie se ovce Merino obvykle kříží s berany nižší kvality British Bred, a pak vznikají **kříženecké** ovčí vlny. Jemnosti vláken tohoto původu jsou 25-50 μm . Jemnosti **anglických** ovčích vln se pohybují 25-70 μm . V tomto případě je známo více než 40 plemen ovcí, z nichž nejznámější jsou Cheviot, Dartmoot, Dorset Jacob atd. Ovce nížinné se nacházejí v Číně, Tibetu, Mongolsku. Z těchto plemen se získávají hrubovlnná vlákna 2x za rok (na rozdíl od jemnovlnných 1x za rok).

Z chemického hlediska jsou vlákna tvořena keratinem, který jim dodává dostatečnou tažnost a zotavovací schopnost. Jejich další předností jsou dobré tepelně izolační vlastnosti způsobené obloučkovitostí vláken. Na druhé straně však jsou náchylná k biologické degradaci. Neodolávají molům, mikroorganismům a plísním. [20]

4.3 Chemická vlákna

Surovinou pro výrobu chemických vláken mohou být přírodní i syntetické polymery. Z přírodních polymerů vznikají vlákna celulózová a bílkovinná. Na bázi syntetických polymerů se získají vlákna polyamidová, polyesterová atd. [21]

4.3.1 Chemická vlákna z přírodních polymerů

Základní surovinou pro tento druh chemických vláken je přírodní polymer. V první fázi musí být přeměněn (tzv. depolymerace) do roztoku. Následuje rozvlákňování buď v horkovzdušné komoře (acetátová vlákna) nebo v lázni (viskózová, měďnatá vlákna). Vlákna bývají často podélně rýhovaná a tvar závisí na srážecích a odpařovacích podmínkách.

4.3.1.1 Acetátová vlákna

Podle chemického složení jsou acetátová vlákna z derivátů celulózy diacetátová a triacetátová. Zdrojem pro výrobu **acetátu (DAC)** je vysoce čistá celulóza (obsah 97-99 %) nebo polynozická vlákna. Dalším krokem je acetylace, při níž dochází k bobtnání ve směsi ledové kyseliny octové, sírové a anhydridu. Doba trvání je 7-8 hodin při teplotě 20°C. Poté se provádí částečné zmýdelnění zředěnou kyselinou octovou při 40°C 20 hodin a pak vyrážení do vody. Těmito procesy se získá spřádací roztok složený z 85 % acetonu a 15 % etanolu o koncentraci 20-35 %. Vlákna se vyrábí mokrým nebo suchým zvlákňováním roztoku. Mokrý zvlákňování se provádí do vody, kde dochází ke koagulaci a srážení. Dnes se spíše používá suché zvlákňování. Zde probíhá odpařování rozpouštědla a sušení při teplotě 60-80°C. Rychlost zvlákňování se pohybuje mezi 250-600 m·min⁻¹. Nakonec se vlákna stabilizují párou nebo vzduchem. Při výrobě **TAC** je postup obdobný. Proces zmýdelnění se vynechává. Rozpouští se v metylenchloridu a ethylenalkoholu. Zvlákňování se pak provádí z taveniny do 255°C. Vlákna se na závěr stabilizují v prostředí vzduchu o teplotě 180°C, nebo v páře 105°C.

Tvarem a profilací jsou podobné viskózovým vláknům. Patří do skupiny termoplastických vláken, která teplem měknou. DAC měknou s teplotou 175-190°C a tají okolo 255°C. TAC odolávají teplotám do 225°C (bod měknutí) a při 300°C už dochází k tání. Vlákna jsou snadno zápalná, ale hoří pomalu. Mezi výhody patří nízká měrná hmotnost, malá tepelná vodivost, malá bobtnavost, nízká navlhavost a výborné elektroizolační vlastnosti. Nevýhodou je nízká pevnost za sucha, vysoký oděr apod. [22]

4.3.1.2 Lyocelová vlákna

Lyocelová vlákna vznikají rozpouštěním celulóзовých vláken v organickém rozpouštědle. Pro výrobu se používá rozpouštědlový systém na bázi N-metylmorfinu-N oxidu (NMMO). Prvním krokem je vytvoření homogenního koncentrovaného roztoku z 8-20 % celulózy, 75-80 % NMMO a 5-12 % vody. Poté je roztok vytlačován přes vzdušnou mezeru do srážecí lázně při teplotě 90-120°C. V lázni probíhá koagulace a dloužení. Následuje praní a sušení vláken. Nakonec pak rekuperace NMMO ze srážecí a prací lázně. Lyocelová vlákna dosahují výborných mechanických vlastností a stability. V porovnání s viskóзовými vlákny mají vyšší pevnost za sucha i mokra, ale nižší tažnost za sucha i za mokra. Dalšími pozitivními vlastnostmi jsou odolnost proti louhům a úplná biologická rozložitelnost. Naopak mezi nedostatky patří nízká elasticita a malá odolnost proti kyselinám. [22]

4.3.1.3 Měďnato-amonná vlákna

Měďnato-amonná vlákna se vyrábí rozpouštěním celulózy v hydroxidu tetraamonoměďnatém. Pro přípravu vláken je potřeba použít vysoce čistý zdroj celulózy až 96 % α -celulózy. Před zvlákňováním se roztok ředí na 7-9 % celulózy, 8 % amoniaku, 3 % mědi. Vlákna se získávají dvěma způsoby - systémem Bemberg a alkalickým zvlákňováním. Systém Bemberg se zakládá na dvoustupňové koagulaci. Nejprve dochází ke srážení v proudící vodě. Vzniká gel, který se orientuje a protahuje. Následuje lázeň v kyselině sírové a vznik vláken srážením celulózy. Vlákna vzniklá tímto způsobem jsou jemná, dobře orientovaná, ale ne příliš pevná. Při alkalickém zvlákňování probíhá koagulace a srážení v lázni hydroxidu sodného. Vlákna jsou hrubší, ale pevnější. Dále se upravují praním a sušením. Měďnato-amonná vlákna se podobají přírodnímu hedvábí. Odolávají teplotám do 150°C a při 170-205°C se rozkládají. Nevýhodou je poměrně nákladná výroba. [22]

4.3.1.4 Viskóзовá vlákna

Hlavní surovinou pro výrobu viskóзовých vláken je zdroj celulózy o čistotě alespoň 88 % α -celulózy, např. smrkové nebo bukové dřevo. Dřevo se nejprve převede na celulóзовou drť (štěpy, mletí). Dalším krokem je zrání, při němž se zkracuje dlouhý řetězec celulózy a působením roztoku hydroxidu sodného vzniká alkalícelulóza. Následuje proces xantogenace, kde působením sirouhlíku vzniká žlutooranžová drť tzv. xantogenát. Rozpouštěním xantogenátu v 4% hydroxidu sodném vzniká viskózní medovitý roztok. Zvlákňování probíhá při teplotě 40-55°C do roztoku s obsahem 12% kyseliny sírové, síranu

sodného a síranu zinečnatého. Tloušťky vláken se pohybují mezi 10-50 μm . Odolávají teplotám do 174°C, při 190°C dochází k rozkladu. Chování vláken je blízké bavlněným vláknům. Viskózoová vlákna tvoří 80 % chemických vláken z přírodních polymerů. Jedná se o levná vlákna, ale způsob jejich výroby je ekologickou přítěží pro životní prostředí. [22]

4.3.2 Chemická vlákna ze syntetických polymerů

Při výrobě chemických vláken ze syntetických polymerů je nejprve nutná samotná příprava polymeru zvlákňováním do šachty. Tvar vláken určují rozvlákňovací trysky. Nejčastěji mají kruhový tvar, ale profilováním lze získat např. snížení žmolovitosti, lepší omak výsledných výrobků, lepší tepelně izolační vlastnosti vláken atd.

4.3.2.1 Akrylová vlákna

Akrylová vlákna (PAN) se vyrábí z polymeru akrylonitrilu s přidavkem chemických látek zlepšující některé vlastnosti vláken např. schopnost absorbovat barviva. Dělí se podle obsahu PAN na „pravá“ polyakrylonitrilová vlákna (obsah > 85 %) nebo modakrylová vlákna (obsah < 85 %). Vlákna se liší od ostatních tím, že PAN se rozkládá, nelze je tedy zvlákňovat z taveniny. Zvlákňování může probíhat třemi způsoby za mokra, za sucha a kombinací „DRY-JET-WET“. Za sucha z roztoku dimethylformamidu (DMF) při 80-150°C přes zvlákňovací šachtu s teplotou vzduchu 230°C. Následuje promývání vodou, dloužení za tepla a stabilizace na vzduchu při 140°C. Za mokra v koagulační lázni vody a DMF při teplotě 20-30°C. V lázni vzniká fibrilární pórovitá struktura. Současným dloužením ve vodě za varu roste orientace a fibrilární uspořádání. Sušením zaniká většina pórů. V případě „DRY-JET-WET“ se používá nejprve vzdušná šachta a pak koagulace v lázni.

Akrylová vlákna byla vyvinuta za účelem nahrazení vlny, proto se vlastnostmi podobají vlněným vláknům. Někdy je dokonce zcela nebo částečně nahrazují (směs vlna/akryl). Vlákna odolávají slunečnímu záření, chemikáliím a nejsou citlivá na vlhkost. Mají dobré tepelně izolační vlastnosti, malou měrnou hmotnost, nízkou navlhavost a cenu. Při teplotách vyšších než 160°C žloutnou, hnědnou a černají. Měknout začínají při 235°C a se zvyšující se teplotou 250-360°C dochází k rozkladu. Značnou nevýhodou je uvolňování kyanovodíku při hoření. [23]

4.3.2.2 Polyamidová vlákna

Polyamidová vlákna (PA) vznikají polykondenzací. Nejrozšířenější jsou dva typy polyamid 6 a polyamid 6.6. Liší se molekulovou strukturou i některými jinými vlastnostmi. Oba typy se získávají zvláknováním roztaveného polymeru do šachty. Z toho vyplývá, že mohou mít nejen různé profily, ale lze vyrobit i mikrovlákna. Dloužením získávají konečné vlastnosti. Jedná se o termoplastická vlákna, proto je nutné výsledné výrobky tepelně fixovat. [24]

U nás se vyrábí spíše Silon (**polyamid 6**; PAD 6). Hlavní surovinou pro výrobu vláken je fenol, ze kterého dále vzniká kaprolaktam. K polymeraci dochází v inertní atmosféře při ohřevu na 220-240°C směsi vody a kaprolaktamu. Směs se taví při teplotě 270°C. Tavenina je protlačována tryskami do chladicí šachty. Dloužení pak probíhá za studena nebo za tepla (homogenní dloužení). Silonová vlákna jsou tvarově stálá a často se mísí s bavlnou a vlnou. Dosahují nejvyšší odolnosti proti oděru a dobrých mechanických vlastností. Mají malou odolnost proti slunečnímu záření, postupně žloutnou. Začínají měknout při teplotě 180°C. Bod tání 225°C je nižší, vzhledem k uspořádání molekul v řetězci. Silonová vlákna se používají i při výrobě netkaných textilií.

Nejrozšířenější typ je Nylon neboli **polyamid 6.6** (PAD 6.6). Vyrábí se mísením metanolových roztoků kyseliny adipové a hexametyléndiaminu za varu. Vzniká bílá nylonová sůl. Polykondenzace probíhá v 60% roztoku nylonové soli ve vodě za teploty 90°C a ohřevem na 260-280°C v prostředí autoklávu po dobu 4-16 hodin. K zvláknování dochází při 270°C (teplota tavení). A zároveň se provádí ofukování v chladicí šachtě parou, jelikož PAD 6.6 krystalizuje rychleji než PAD 6. Dloužení je obdobné jako u PAD 6. Vlákna se vyznačují vyšší tepelnou stabilitou, dobrou pevností a trvanlivostí. Teplota měknutí je 220°C a bod tání se pohybuje okolo teploty 256°C. [23]

4.3.2.3 Polyesterová vlákna

Základní surovinou pro výrobu polyesterových vláken (PES) je ropa, ze které se získává dimethyltereftalát a glykol. Proces polykondenzace je obdobný jako u polyamidových vláken. Polykondenzace probíhá za vakua při teplotě 220-270°C a jejím produktem je polyetylttereftalát (PET). Tavenina se zvláknuje do šachty a dlouží se za tepla ve vodě při 75-90°C. Zde probíhá krystalizace a orientace, jejímž výsledkem je fibrilární struktura.

Vlákna jsou různě jemná, profilovaná případně i bikomponentní. Mezi významné vlastnosti patří vysoká odolnost na světle, vůči povětrnostem a mikroorganismům a také třeba nízká navlhavost. Některé z vlastností se dají zlepšit chemickými a mechanickými procesy. Polyesterová vlákna jsou trvanlivá a odolná proti oděru. Odolávají vyšším teplotám, při 230°C měknou a tají při 258°C. [23]

Se vzrůstajícím množstvím PET lahví se projevuje snaha o jejich recyklaci. Vytvářejí se z nich vlákna na bázi polyetylentereftalátu (PET). Druhotná polyesterová vlákna se vyrábí z PET drtě vzniklé rozdrčením recyklovaných PET lahví. Při výrobě je možné využít povrchových nebo konečných úprav pro požadovanou technologii použití nebo technologii zpracování (pojení). Jedná se o levná, velmi jemná a snadno barvitelná vlákna. Vyznačují se spolehlivou a stálou kvalitou. Používají se jako doplněk v textilním průmyslu nebo pro výrobu netkaných textilií. PET vlákna jsou vhodná pro všechny technologie výroby netkaných textilií na bázi vrstvení vláken za sucha. Lze je mísit s přírodními i umělými vlákny. PET vlákna by mohla nalézt využití i při tvorbě izolačních materiálů díky poměrně nízké ceně. [25]

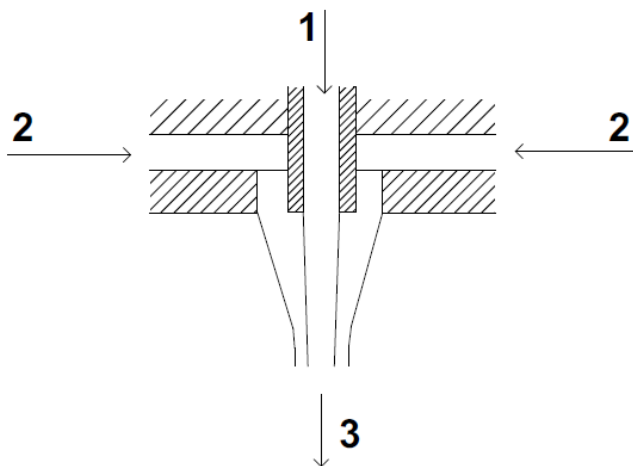
4.3.2.4 Polypropylenová vlákna

Polypropylenová vlákna se získávají polymerací polypropylenu za působení Ziegler-Nattových katalyzátorů (např. chlorid titaničitý) za teploty 100°C a tlaku 3 MPa. Zvlákňování probíhá z taveniny, pak se chladí v dlouhé šachtě a nakonec probíhá dloužení.

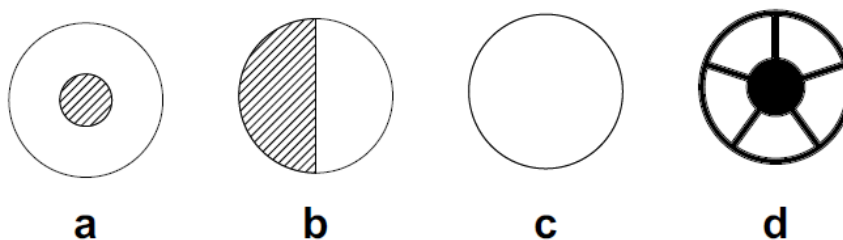
Polypropylenová vlákna neodolávají UV záření a vysokým teplotám. Odolávají teplotám do 110°C, při dosažení 149-154°C začínají měknout a tají za teploty 165-170°C. Mezi jejich výhody patří nízká tepelná vodivost, nízká navlhavost, odolnost proti oděru, vysoká pevnost, trvanlivost a snadná formovatelnost. Vzhledem k poměrně nízké ceně se jedná o vlákna s širokým uplatněním v různých průmyslových odvětvích např. technické textilie pro stavebnictví. [23]

4.3.2.6 Bikomponentní vlákna

Bikomponentní vlákna vznikají zvlákňováním dvou různých polymerů pomocí zvláštní zvlákňovací hubice (obr. 1). Existuje několik typů bikomponentních vláken.



Obrázek 1: Průřez zvlákňovací hubicí pro výrobu bikomponentních vláken typu jádro-plášť – 1 přívod polymeru (jádro), 2 přívod polymeru (plášť), 3 – vznikající bikomponentní vlákno



Obrázek 2: Typické tvary příčných řezů bikomponentních vláken

Při výrobě netkaných textilií se nejčastěji využívají vlákna typu jádro-plášť (obr. 2 – a) nebo bok po boku (obr. 2 – b). Skládají se z výše a níže tající polymerní složky. Jako výše tající (jádro) se používá nejčastěji polyester a níže tající (plášť) kopolyester nebo polypropylen. Vlákna se používají ve směsi se základními vlákny. Při pojení pak bikomponentní vlákna vytváří pojící složku. V místech křížení vláken vznikají adhezní spoje tzv. bodové. Část vláken tvoří pohyblivé úseky, což způsobuje dobrou ohebnost a nízký počáteční modul v tahu výrobků. Vlákna typu ostrovy v moři (obr. 2 – c) se používají k tvorbě velmi jemných vlákenných struktur extrakcí matrice např. syntetické usně. Poslední vlákna (obr. 2 – d) se rozštěpí na několik jemných fibril, které způsobují jemný omak výrobků. [26]

5 Technologie pojení tepelně izolačních rohoží

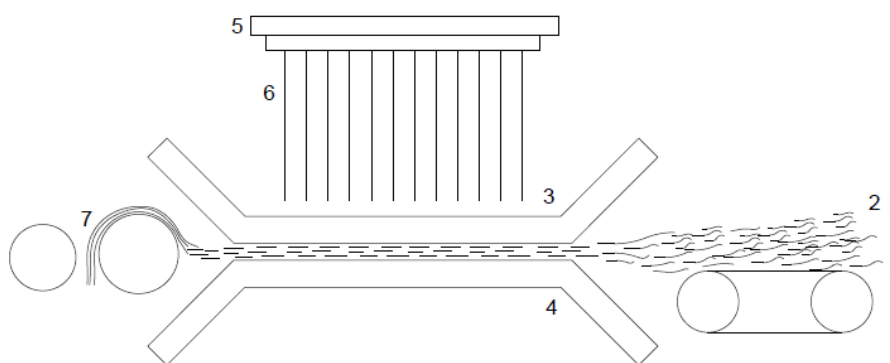
Hlavními surovinami pro výrobu netkaných textilií jsou sekundární zdroje vláken získané z technologických odpadů. Odpady pocházejí z textilního i oděvního průmyslu a ze sběrových odpadů. V závislosti na původu mohou být v různém stupni zpracování např. směs vláken, trhanina, kusy textilu. Liší se také v procentuálním zastoupení jednotlivých druhů vláken. V současné době se složení textilních vláken mění s vývojem cen, dostupností zdrojů a vývojem nových technologií. Se zvyšující se cenou klesá podíl vlny a méně se používá i viskóza z hlediska náročnosti výroby a ekologických důvodů. Často se používají polypropylenová vlákna vznikající z polymeru a projevuje se snaha o zařazení přírodních vláken např. juty. Získaný textilní odpad se tedy skládá ze směsi vláken až po kousky textilu o různém složení. Dalšími procesy se třídí podle složení vláken. Rovněž dochází k úpravám a rozvláknění textilu. Hlavním cílem je dosažení rovnoměrného rozložení vláken po celé délce rohože a jejich vzájemné propojení. Textilní vlákna lze spojovat třemi způsoby – mechanicky, chemicky a termicky. [26]

5.1 Mechanické pojení

Mechanické pojení spočívá v působení mechanické síly na vlákennou vrstvu. Technologie jsou založeny na přeorientování jednotlivých vláken. Nejčastěji se používá vpichování, které lze využít i pro výrobu tepelně izolačních materiálů. Dalšími metodami jsou zpevňování paprsky vody, proplétání a dnes již zastaralé plstění.

5.1.1 Technologie vpichování

Metoda vpichování je jednou z nejstarších a zároveň nejrozšířenějších způsobů zpevňování vlákenných vrstev. Podstatou je provázání vlákenné vrstvy svazky vláken pomocí jehly. Jehla je opatřena ostny a při průniku vrstvou dochází k přeorientování části vláken. Proces vpichování však výrazně redukuje tloušťku vlákenné vrstvy. Dále sebou nese změnu délky a šířky vrstvy a změnu v orientaci vláken. [26]



Obrázek 3: Vpichovací zařízení – 1 příváděcí dopravník, 2 vlákenná vrstva, 3 stěrací rošt, 4 opěrný rošt, 5 jehelní deska, 6 jehly, 7 odváděcí válec.

Vlákna jsou přiváděna pásovým dopravníkem mezi stěrací a opěrný rošt. Nad rošty je umístěna deska s jehlami, které pronikají otvory v roštech a zpevňují tak vlákennou vrstvu. Jednotlivé jehly jsou vybaveny ostny zachytávajícími vlákna. Tím dochází k přeorientování vláken kolmo k vrstvě. Stěrací rošt zabezpečuje vysunutí jehel z vlákenné vrstvy při zpětném pohybu. Vrstva vláken je posunována odtahovými válci po spodním opěrném roštu.

Míra zpevnění vlákenné vrstvy charakterizuje počet vpichů na jednotku plochy vrstvy. Konstrukce roštů, jehelní deska a pohybové ústrojí musí být dimenzovány na poměrně velké zatížení. Při každém vpichu působí totiž na jehlu síla až 10 N. Tloušťku vlákenné vrstvy řídí příváděcí zařízení skládající se ze dvojice válců. Může být až 250 mm, menší než vzdálenost mezi rošty a bez vzniku nerovnoměrností. Struktura a vlastnosti vpichovaných textilií závisí kromě počtu vpichů na jednotku plochy i na dalších parametrech - hloubce vpichu, typu a způsobu rozmístění jehel, tahovými vlastnostmi, délkou, jemností a povrchovými vlastnostmi vláken atd. Soudržnost vlákenné vrstvy zajišťuje tření mezi vlákny. Plošná hmotnost se pohybuje mezi 100-2000 g·m⁻². [26]

5.1.2 Technologie zpevňování paprsky vody

Technologie zpevňování paprsky vody (spunlaced) spočívá v působení proudu vody na jednotlivá vlákna rouna a k jejich provázání. Vlákenná vrstva vzniká proviřováním, které probíhá zpevňováním vodními paprsky a následným odvodňováním a sušením. Technologie spunlaced nevyužívá ke zpevnění žádné chemikálie ani pojiva. Soudržnost vlákenné vrstvy způsobují třecí síly mezi vlákny. [26]

Technologií spunlaced lze získat výrobky o vynikajících mechanických vlastnostech. Textilie spunlaced jsou charakteristické dobrými absorpčními vlastnostmi a výbornou prodyšností. Plošné hmotnosti vlákenných vrstev jsou 10-100 g·m⁻². Výsledné výrobky nacházejí využití jako podklady pro provrstvování, oděvní vložky, dekorace, filtry, čistící textilie, izolace, geotextilie a stavební textilie. [26]

5.1.3 Technologie proplétání

Technologie proplétání je založena na mechanickém provázání vlákenné soustavy se soustavou vazných nití. Plošně proplétané textilie se nazývají proplety a strojní zařízení pro jejich výrobu proplétací stroje. Pro výrobu propletů se nejčastěji používají osnovy z bavlněných, vlněných nebo směsových přízí nebo ve formě viskóзовého, PAD, PES nebo POP hedvábí. Proplety se používají jako čistící textilie, mycí hadry, technické i oděvní izolační materiály, bytové textilie, obalové materiály. Technologie výroby je poměrně náročná, z tohoto důvodu nenacházejí ve stavebnictví uplatnění ve větší míře. [26]

5.2 Chemické pojení

Při chemickém způsobu zpevňování se provádí fixace struktury pomocí vneseného pojiva. Nejčastěji se používají polymerní disperze. Základními kroky při výrobě chemicky spojených textilií jsou příprava vlákenné vrstvy, nanášení a zpevnění pojiva, odstranění disperzního prostředí (disperze, zpěněné disperze) nebo rozpouštědla (roztoky) a ztužení pojiva (sítování). K nanášení pojiva se používá několik způsobů – impregnace, stříkání pojiva na vlákennou vrstvu nebo na jednotlivé pavučiny, vzorové nanášení tiskem a raklí. V případě impregnace dochází k prosycení vrstvy disperzí a k odždímání mezi dvojicí válců. Následně je vyvolána koagulace pojiva, odstranění vody a sítování. Způsob nánosu pojiva stříkáním se zakládá na rozstříkávání pojiva nad nebo i pod vlákennou vrstvou. Při vzorovém nanášení tiskem se provádí nespojitý nános pojiva v ploše textilie. Dělí se na části propojené zajišťující vzájemnou soudržnost vláken a nepropojené části s vysoce pohyblivými úseky vláken. Nános raklí se tvoří roztíráním pojiva zejména na povrch textilie. Vzhledem k velké spotřebě pojiva, u všech způsobů nanášení pojiva, se pro výrobu tepelně izolačních materiálů v oblasti stavebnictví chemické pojení příliš nepoužívá. [26]

5.3 Termické pojení

Termické pojení je založeno na zpevňování vlákenných vrstev pojivy na bázi pevných polymerů nebo kopolymerů za zvýšené teploty. Pojivo se používá ve formě nanášení prášku či pasty na vlákennou vrstvu, vrstvení vlákenné vrstvy s plošným pojivovým útvarem (mřížka, folie) nebo na bázi pojivových vláken. [26] Mezi způsoby termického zpevňování vlákenných vrstev patří pojení kalandrem, ultrazvukem, infračerveným zářením a teplovzdušné pojení. Z ekonomického hlediska se pro výrobu izolačních prvků nejvíce využívá teplovzdušné pojení vlákenné vrstvy ze směsi základních a pojivových vláken (bikomponentních vláken).

5.3.1 Teplovzdušné pojení s využitím technologie Air-lay

Technologie Air-lay je jedním z možných způsobů vytváření vlákenných vrstev rohože. Při Air-lay dochází k aerodynamickému tvarování vláken ve vrstvě. Metoda je založena na působení vzduchu na jednotlivá vlákna a jejich rovnoměrnému rozložení v celé ploše. Hlavní výhodou je možnost zpracování přírodních, syntetických i recyklovaných vláken. Mimo to je výhodou také vysoká energetická účinnost, jelikož spotřeba vzduchu je založena na reálné potřebě. [27]

Vlákenná vrstva rohože je tvořena základními i pojivovými vlákny. Musí být propustná, protože prochází horkovzdušnou pojící komorou s cirkulujícím horkým vzduchem. Jeho teplota musí být postačující k roztavení pojiva. Udržuje ji ohřevný a regulační systém. K prohánění horkého vzduchu vrstvou se používá ventilátor. Tímto způsobem teplo rychle prochází strukturou okolo vláken a dochází k rychlému ohřevu celé vrstvy. Uvnitř nebo za pojící komorou jsou umístěny kalandrovací válce. Používají se ke zvýšení pojícího efektu. Kalandrovací válce působí tlakem na vlákennou vrstvu resp. na taveninu pojiva. Nevýhodou je snížení objemu rohože, tedy zvýšení objemové hmotnosti. Objemové hmotnosti výrobků se pohybují $5\text{--}200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a plošné hmotnosti mezi $0,01\text{--}2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. [26]

Samotné pojení probíhá pomocí bikomponentních nebo monokomponentních vláken. V případě monokomponentních vláken není účinek tak efektivní. Při výrobě tepelně izolačních materiálů je proto vhodnější použití bikomponentních vláken a jejich množství se pohybuje do 15 %. Skládají se z jádra a pláště. Jádro tvoří materiál o vyšší teplotě tavení a plášť o nižší tavicí teplotě. Působením teploty v pojící komoře dochází bodovým spojmům, tedy roztavení pláště a propojení vláken ve struktuře rohože. Z toho vyplývá, že teplota

v pojící komoře je závislá na materiálu použitém k opláštění bikomponentního vlákna, respektive na jeho teplotě tavení. Na pevnost spojů mezi vlákny má vliv viskozita taveniny, povrchové napětí mezi pojivými a základními vlákny, uspořádání vláken v jednotlivých vrstvách a rychlost proudění vzduchu. Důležitá je také orientace vláken, která se může působením vzduchu mírně změnit a propustnost jednotlivých vrstev. Jako základní vlákna se často používají odpadní vlákna, u kterých je nutné brát zřetel na čistotu vláken. Znečištění např. od olejových látek má negativní vliv na pevnost spojů vláken a při ohřevu se odpařují a tím znečišťují ovzduší. [26]

5.3.2 Technologie Struto

Technologie Struto se využívá k tvorbě kolmo kladených netkaných textilií. Od předchozího teplovzdušného pojení se liší právě orientací vláken ve vertikální poloze. V technologii Struto lze použít všechny typy vláken - recyklovaná, přírodní a syntetická ve směsi s vlákny bikomponentními. Po smíchání základních a pojivových vláken následuje mykání. Kolmé kladení vláken zajišťuje vibrační kolmý kladeč. Záhyby jsou stlačeny dohromady do spojitě struktury, která vstupuje ve svislé poloze do vyhřívané tepelné pojící komory. Dále přechází do chladicí zóny. Až po ochlazení dochází k vytvoření trvalé struktury. Nakonec se vlákenná vrstva nařeže na požadované rozměry. Výška konečných produktů se pohybuje mezi 15 až 40 mm v závislosti na typu vláken a hustotě konečného výrobku. Minimální plošná hmotnost výrobků je $120 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. Výsledný výrobek získá odolnost vůči zatížení a zotavení po opakovaném stlačení. Vyznačuje se také dobrými tepelně izolačními vlastnostmi a snadnou recyklovatelností. [28][29]

6 Tepelně a akusticko izolační materiály

Jako **tepelně izolační materiál** lze dle normy ČSN 73 0540-1 označit materiál výrazně omezující šíření tepla, vykazující charakteristickou hodnotu součinitele tepelné vodivosti maximálně $0,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ při referenčních teplotních a vlhkostních podmínkách a daném stáří. [30] Zabudovaný tepelně izolační materiál do konstrukce zabraňuje přenosu tepelné energie z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou. Jedná se o významný materiál používající se ke snižování tepelných ztrát v zimě a pro zamezení pronikání tepla do budovy v letním období. Izolační vlastnosti výrobků se odvíjí od chemického složení a fyzikální struktury. Tepelně izolační materiály se rozdělují podle:

- dle druhu základní hmoty – organické, anorganické,
- dle struktury – vláknité, pórovité (pěnové), zrnité,
- dle obsahu pojiva – pojivo obsahující, pojivo neobsahující,
- dle tvaru výrobku – volný (zásyp, vlna), plochy (deska, rohož, plst'), tvarový (skruže, segmenty), šňůrový (těsnicí provazce),
- dle reakce na oheň – A1, A2, B, C, D, E, F,
- dle materiálu:
 - pěnoplastické – pěnový a extrudovaný polystyren, pěnový polyuretan, pěnový polyetylen, pěněné pryskyřice, pěněné PVC,
 - vláknité materiály – skleněná vlákna, minerální vlákna, syntetická vlákna, izolace na bázi ovčí vlny,
 - pěnené silikáty – pěnové sklo,
 - minerální materiály – expandovaný perlit, vermikulit, strusková pemza, keramzit,
 - materiály na bázi dřeva a přírodních vláken – piliny a mineralizované hobliny, sláma, rákos, korek a korkové desky, dřevovláknité a dřevotřískové desky,
 - materiály na bázi celulóзовých vláken – drcený mineralizovaný papír, desky z asfaltového papíru,
 - materiály nové generace – kalciumsilikáty, vakuové izolace. [31]

Jednotlivé tepelně izolační materiály se mezi sebou liší v mnoha ohledech. V závislosti na jejich vlastnostech může být rozdílná i oblast použití. Podle aplikace se dělí:

- vnější izolace obvodového pláště – používají se ke kompletnímu zateplení budovy nebo jen kritických částí, ve kterých by mohly vzniknout tepelné mosty,

- izolace střešního pláště – u plochých a jednoplášťových střech se ukládají v souvislé vrstvě a u šikmých mezi krokve,
- vnitřní vodorovné a svislé konstrukce – mají funkci zvukově izolační u podlahových a stropních konstrukcí nebo ve vnitřních dělicích konstrukcích s různými teplotami vnitřních prostor,
- vnitřní izolace obvodového pláště – v případě rekonstrukcí, kdy není možné zateplení z vnější části; může nastat problém s posunem kondenzační zóny vodní páry směrem do interiéru, proto toto použití není příliš vhodné,
- speciální izolace – použití nacházejí v oblasti technického zařízení budov, konkrétně k izolacím potrubních rozvodů vody, technickým izolacím, izolacím bojlerů, zásobníků, klimatizačních a chladících zařízení. [31]

Jak již bylo řečeno, tepelně izolační materiály výrazně omezují šíření tepla. Z toho důvodu jsou stěžejním nástrojem ke zlepšování tepelné ochrany budov, kterou upravuje norma ČSN 73 0540. Tepelná ochrana budov stanovuje tepelně technické požadavky v oblasti navrhování a ověřování budov s požadovaným stavem vnitřního prostředí při jejich užívání. Budovy musí zajišťovat úsporu tepelné energie a ochranu zdraví, zdravých životních podmínek a životního prostředí. ČSN 73 0540 se zabývá se novými budovami, stavebními úpravami, udržovacími pracemi, změnami v užívání budov a jinými změnami dokončených budov. V části 2: Požadavky jsou uvedeny tepelně izolační požadavky:

- šíření tepla konstrukcí a obálkou budovy – nejnižší povrchová teplota konstrukce, součinitel prostupu tepla, průměrný součinitel prostupu tepla, lineární a bodový činitel prostupu tepla, pokles dotykové teploty podlahy,
- šíření vlhkosti konstrukcí – zkondenzovaná vodní pára uvnitř konstrukce, roční bilance kondenzace a vypařování vodní páry uvnitř konstrukce,
- šíření vzduchu konstrukcí a budovou – průvzdušnost, větrání místností. [30]

Úspora energie a tepelná ochrana patří podle ust. § 8 vyhlášky ministerstva pro místní rozvoj č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích na stavby, ve znění pozdějších předpisů (dále jen „Vyhláška č. 268/2009 Sb.“) mezi základní požadavky kladené na stavby. Dalšími základními požadavky jsou mechanická odolnost a stabilita, požární bezpečnost, ochrana zdraví osob a zvířat, zdravých životních podmínek a životního prostředí, ochrana proti hluku a bezpečnost při užívání. [32]

Akustické neboli zvukově izolační materiály brání šíření zvuku a hluku. Zvuk je z fyzikálního hlediska mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopno vyvolat sluchový vjem. Jako obtěžující nebo rušivý zvuk je označován hluk. Při dlouhodobém působení může mít hluk nežádoucí účinky na zdraví člověka a nelze si na něj zvyknout. Zvuk či hluk se může šířit vzduchem, konstrukcí nebo budovou. Touto problematikou se zabývá stavební fyzika.

Ochranou proti hluku se zabývá zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví, ve znění pozdějších předpisů, jehož prováděcím předpisem je nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. [34][35] Ochrana proti hluku patří rovněž mezi základní požadavky kladené na stavby podle ust. § 8 vyhlášky č. 268/2009 Sb. [36] Dále je ochrana hluku popsána také v technické normě ČSN 73 0532 – Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních výrobků. [37]

6.1 Požadavky tepelně izolační

Součinitel prostupu tepla U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] vyjadřuje prostup tepla celou konstrukcí a patří mezi základní tepelně technické požadavky na konstrukce. Je charakterizován jako celková výměna tepla v ustáleném stavu mezi prostory vzájemně oddělenými stavební konstrukcí. U jednotlivých materiálů je definován jako množství tepla, které projde konstrukcí nebo materiálem o ploše 1 m^2 , při rozdílu teplot o 1 K . Jedná se o obrácenou hodnotu **tepelného odporu R_t [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]** při prostupu tepla. Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla jsou uvedeny v normě ČSN 73 0540-2. Hodnota součinitele prostupu tepla musí být menší nebo rovna požadované hodnotě (viz. příloha 1). [30]

6.1.1 Součinitel tepelné vodivosti

Tepelně izolačním materiálem se označuje materiál o nízké tepelné vodivosti, kterou charakterizuje hustota tepelného toku při jednotkovém teplotním gradientu. Vyjadřuje se pomocí součinitele tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]. Součinitel tepelné vodivosti charakterizuje schopnost materiálu vést teplo. Je definován jako množství tepla, které projde za jednotku času tělesem, aby byl na jednotkovou délku jednotkový teplotní spád. Čím nižší je hodnota součinitele tepelné vodivosti, tím hůře materiál vede teplo. Z výše uvedeného vyplývá, že se tepelně izolační materiály používají pro snížení tepelných ztrát budov.

Vliv na hodnotu součinitele tepelné vodivosti má řada materiálových charakteristik – chemické složení, objemová hmotnost a průvzdušnost materiálu, tloušťka, délka a orientace vláken ve struktuře, teplota a vlhkost okolního prostředí. Hodnota součinitele tepelné vodivosti tepelně izolačních materiálů se pohybuje v rozsahu od 0,025 do 0,04 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Návrhové hodnoty součinitele tepelné vodivosti vybraných materiálů jsou uvedeny v ČSN 73 0540-3 nebo v podkladech od výrobců. [38]

Součinitel tepelné vodivosti se stanovuje stacionárními i nestacionárními metodami. Stacionární metody využívají ustáleného teplotního stavu. Metody nestacionární neustáleného teplotního stavu. Mezi stacionární patří metoda válce dle ČSN 72 7011, metoda koule ČSN 72 7013 a nejpoužívanější metoda desky. Metoda desky lze měřit metodou chráněné teplé desky ČSN 72 7012-2, ČSN EN 12667 a ČSN EN 12939, ISO 8302 a metodou měřidla tepelného toku ČSN 72 7012-3, ČSN EN 12667 a ČSN EN 12939, ISO 8301. Mezi nejčastěji používané nestacionární metody patří metoda nestacionárního tepelného toku ČSN EN 72 1105, metoda topného drátu ČSN EN ISO 8894-1, metoda záblesková a šoková metoda.

Ve struktuře tepelně izolačních materiálů se teplo může šířit vedením, prouděním a sáláním. Ve vláknitých izolačních materiálech se teplo nejčastěji šíří vedením, které je charakterizováno součinitelem tepelné vodivosti. Hodnota součinitele tepelné vodivosti závisí na chemickém složení, krystalické struktuře, homogenitě materiálu. Mezi další faktory ovlivňující výslednou hodnotu součinitele tepelné vodivosti patří vzduch, který je součástí tepelně izolačních materiálů na bázi vláken. Vzduch má poměrně nízkou hodnotu součinitele tepelné vodivosti 0,024 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti není lineární. Průběh je podobný tvaru písmena U. V minimu se nachází nejnížší hodnota součinitele tepelné vodivosti při optimální objemové hmotnosti. V levé části, kde je objemová hmotnost nízká, se šíří teplo prouděním. Což způsobuje velká vzdálenost mezi jednotlivými vlákny a velký podíl vzduchu ve struktuře tepelně izolačního materiálu. Naopak v pravé části se zvyšuje součinitel tepelné vodivosti i objemová hmotnost. Teplo se šíří vedením skrze vlákna.

Dalším důležitým parametrem je orientace vláken ve struktuře. Tepelně izolační materiály mohou být jednosměrné (technologie kolmého kladení), vrstvené (technologie vodorovného kladení) a náhodně prostorově orientované. Vhodnější je orientace vláken kolmo ke směru tepelného toku. V případě, že jsou vlákna uspořádána rovnoběžně se směrem tepelného toku, nemusí tepelný tok překonávat takové množství překážek jako při kolmém uložení.

Šíření tepla prouděním nastává u kapalin a plynů. V případě, že vláknitý tepelně izolační materiál obsahuje nízký podíl vláken a vysoký podíl vzduchu, může dojít k proudění tepla a zvýšení průvzdušnosti materiálu. Průvzdušnost V [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] určuje množství vzduchu, který projde za jednotku času stavební konstrukcí, stavebním dílcem, konstrukčním stykem nebo funkční spárou uzavřené či uzamčené výplně otvoru při daném rozdílu statických tlaků vzduchu působících na jeho vnitřní a vnější straně a při daném atmosférickém tlaku vzduchu, teplotě vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu. Průvzdušnost i proudění ovlivňuje tloušťka vláken. Zde platí nelineární závislost. Čím větší množství tenčích vláken obsahuje vláknitá izolace při konstantní objemové hmotnosti, tím menší je vzdálenost mezi vlákny, proudění a průvzdušnost.

Vlivem vlhkosti dochází k degradaci tepelně izolačních vlastností materiálu. Zvyšuje se součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost a snižuje se trvanlivost vláknitých izolantů. Transport vlhkosti probíhá difúzí molekul vodní páry a postupně nahrazuje vzduch mezi vlákny. Při vyšších teplotách dochází k sálání.

6.2 Požadavky akustické

Akustické izolace se používají ve stěnách, příčkách, podlahách i střepech. Často se využívá tzv. dvojité stěny, kdy se akusticko izolační materiál vkládá mezi dvojité konstrukce a dochází k lepšímu pohlcování hluku. Z pohledu vlastností dělicích konstrukcí jsou požadované hodnoty z hlediska ochrany proti hluku uvedeny v ČSN 73 0532 (viz. příloha 2). [37] Mezi akustické požadavky na dělicí konstrukce patří vzduchová a kročejová neprůzvučnost. Vzduchová neprůzvučnost se stanovuje pro svislé a vodorovné konstrukce. Kročejová neprůzvučnost se týká jen konstrukcí vodorovných především podlah.

Vzduchová neprůzvučnost vyjadřuje schopnost konstrukce snížit šíření hluku vzduchem. Charakterizuje akusticko izolační vlastnosti dělicí konstrukce. Požadavky na vzduchovou neprůzvučnost jsou uvedeny v normě ČSN 73 0532:

- mezi místnostmi v budovách – na základě charakteru oddělovaných místností (chráněné místnosti příjmu a místnosti zdroje hluku) a v závislosti na směru přenosu zvuku (horizontální nebo vertikální),
- obvodových plášťů budov – na základě charakteru zvukově izolované místnosti (chráněné místnosti příjmu) a hodnot hluku před fasádou. [37]

Kročejová neprůzvučnost popisuje schopnost stavebních prvků nebo částí budov omezovat přenos kročejového zvuku mezi místnostmi (vysílací a přijímací místnost). Kročejový hluk vzniká mechanickým vlněním od pocházení osob po podlaze. Vyjadřuje se pomocí hladiny akustického tlaku v přijímací místnosti. Požadavky na kročejovou neprůzvučnost shrnuje norma ČSN 73 0532. [37]

6.2.1 Zvuková pohltivost

Významnou vlastností akustických izolačních materiálů je zvuková pohltivost, která je důležitá především z pohledu vzduchové neprůzvučnosti dělicích konstrukcí. Dále je významná v oblasti akustiky vnitřních prostorů a protihlukových opatření v oblasti akustiky vnějšího prostoru. Vyjadřuje schopnost materiálu pohlcovat dopadající zvuk. Pohlčený zvuk charakterizuje **činitel zvukové pohltivosti α [-]**. Jeho hodnota se získá podílem pohlčeného akustického výkonu k dopadajícímu. Závisí na druhu materiálu, úhlu dopadu vlny a kmitočtu.

U konstrukcí a u některých druhů stavebních výrobků se činitel zvukové pohltivosti stanovuje v dozvukové místnosti dle ČSN EN ISO 354. U akustických izolací se stanovuje podle ČSN ISO 10534-2 Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích. Při měření se využívá Kuntova trubice. V trubici je vytvořeno stojaté vlnění a na konci umístěn zkoušený vzorek. Z naměřeného maxima a minima se stanoví činitel zvukové pohltivosti. [39] Následně se lze dle ČSN EN ISO 11654 stanovit jednočíselná hodnota neboli vážený činitel zvukové pohltivosti. [40]

6.2.2 Dynamická tuhost

Dynamická tuhost určuje schopnost pružného materiálu tlumit vznikající kmity. Stanovuje se podle normy ČSN ISO 9052-1 rezonanční metodou v laboratorních podmínkách. Vychází se z poměru dynamické síly k dynamické výchylce. Dynamická tuhost je vztažena na jednotku plochy. Mechanickou soustavu tvoří zkušební vzorek a zatěžovací deska budící vibrace ve vertikálním směru kolmo na plochu vzorku. Čím nižší je hodnota dynamické tuhosti, tím lepší jsou akusticko izolační vlastnosti materiálu. [40]

6.3 Mechanické vlastnosti

Požadavky mechanických vlastností vychází z použití materiálu a z příslušného zatížení v konstrukci. Při aplikaci do plovoucích podlah jsou důležité hodnoty napětí v tlaku při 10% deformaci a pevnost v tahu kolmo k rovině desky. Při použití jako výplňové izolace vnitřních i obvodových dělicích konstrukcí není kladen tak velký důraz na vysoké pevnosti, nejedná se totiž o materiály nosné. Musí být spíše schopné odolávat vůči zatížení vlastní tíhou.

6.3.1 Pevnost v tahu kolmo k rovině desky

Pevnost kolmo k rovině desky se stanoví dle ČSN EN 1607 jako podíl maximální tahové síly, naměřené v průběhu tahového namáhání kolmo k povrchu výrobku a průřezové plochy zkoušeného vzorku. V případě vláknitých tepelně i zvukově izolačních materiálů lze touto metodou zjistit pevnost spojů mezi vlákny a odpor proti rozvláknění. [42]

6.3.2 Pevnost v tlaku (napětí při 10% deformaci)

Měření pevnosti v tlaku se provádí podle normy ČSN EN 826. Zkušební vzorek se zatěžuje určitou rychlostí kolmo na jeho větší rovnoběžné povrchy tlakovou silou. Současně se zaznamenává pracovní diagram. Výsledkem zkoušky je maximální tlaková síla přenesená zkušebním vzorkem. V případě, že nedojde k žádnému porušení, uvede se hodnota **napětí v tlaku při 10 % deformaci**. Výsledné napětí v tlaku se získá podílem stanovené síly k původní zatěžovací ploše vzorku. Vláknité izolační výrobky se zkouší především kvůli zmapování chování při zatěžování. Při aplikaci do plovoucích podlah je stěžejní právě schopnost vzdorovat působícímu provoznímu zatížení. [44]

III. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍL PRÁCE

Práce se zabývá možnostmi vývoje tepelně i akusticko izolačních materiálů na bázi textilních vláken. Cílem je nalezení vhodného zdroje odpadních vláken z textilního průmyslu nebo vyřazeného textilu. Vzhledem k použití druhotných surovin je kladen důraz na co nejlepší tepelně i akusticko izolační vlastnosti materiálů. V rámci práce bude proveden výběr potencionálně perspektivních surovin, návrh technologie výroby izolačních rohoží a ověření vlastností měřením na prototypových vzorcích izolantů. Tepelně izolační vlastnosti budou zastoupeny součinitelem tepelné vodivosti ve vysušeném i vlhkém stavu. Mechanické vlastnosti budou stanoveny zkouškami napětí při 10% deformaci a pevností v tahu kolmo k rovině desky. Akustické vlastnosti budou ověřeny dynamickou tuhostí a zvukovou pohltivostí. Nedílnou součástí práce bude i ekonomické vyhodnocení.

8 METODIKA PRÁCE

Cílem práce bylo vytipovat vhodné zdroje vláken pro výrobu tepelně i akusticko izolačních materiálů. Na základě teoretické práce byly shledány jako potencionální zdroje vláken textilní odpady z výroby netkaných textilií, z textilního průmyslu a z vyřazených oděvů. Nejvhodnějšími materiály pro výrobu tepelně i akusticko izolačních materiálů byly vybrány odpadní vlákna z bavlny, lnu a polyesteru. Dalším úkolem byl návrh technologie výroby tepelně izolačních rohoží. Na základě provedeného průzkumu technologií pojení bylo vyhodnoceno jako nejefektivnější teplovzdušné pojení v kombinaci s technologií Air-lay. Pojení tepelně i akusticko izolačních rohoží bylo provedeno v teplovzdušných komorách pomocí bikomponentních vláken. Jejich podíl ve směsi byl 15 %. Bikomponentní vlákna byly tvořeny dvěma druhy vláken o výše a níže tající složce. Za zvýšené teploty došlo k propojení jednotlivých vláken bodovými spoji a tím ke stabilizaci celé struktury tepelně i akusticko izolačního materiálu. Uvedenou technologií byly vyrobeny prototypové vzorky izolantů o různém složení odpadních vláken.

Zkoumané tepelně i akusticko izolační materiály byly vyvinuty za účelem aplikace především jako výplňové izolace do vnitřních i obvodových konstrukcí. Podle těchto požadavků byla provedena měření. Nejprve byly změřeny fyzikální vlastnosti jako tloušťka a objemová hmotnost zkoumaných materiálů. V oblasti tepelně izolačních materiálů je nejdůležitějším parametrem součinitel tepelné vodivosti. Jeho hodnota je ovlivňována transportem tepla a vlhkosti, proto bylo měření provedeno v suchém, vzduchosuchém (za laboratorních podmínek) i ve vlhkém stavu. Následovalo stanovení sorpčních vlastností zkoumaných tepelných i akustických izolantů. Akustické vlastnosti byly stanoveny činitelem zvukové pohltivosti a dynamickou tuhostí. Mechanické vlastnosti byly ověřeny měřeními pevnosti v tahu kolmo k rovině desky a pevnosti v tlaku resp. napětí při 10% deformaci. Na závěr bylo provedeno ekonomické zhodnocení zkušebních materiálů a jejich srovnání s běžně dostupnými výrobky na trhu. Na závěr bylo provedeno multikriteriální hodnocení zkoumaných izolantů v závislosti na použití jako výplňové izolace primárně pro vnitřní dělicí konstrukce (lehké příčky), sekundárně potom do obvodových plášťů a šikmých střech.

9 ZKUŠEBNÍ VZORKY

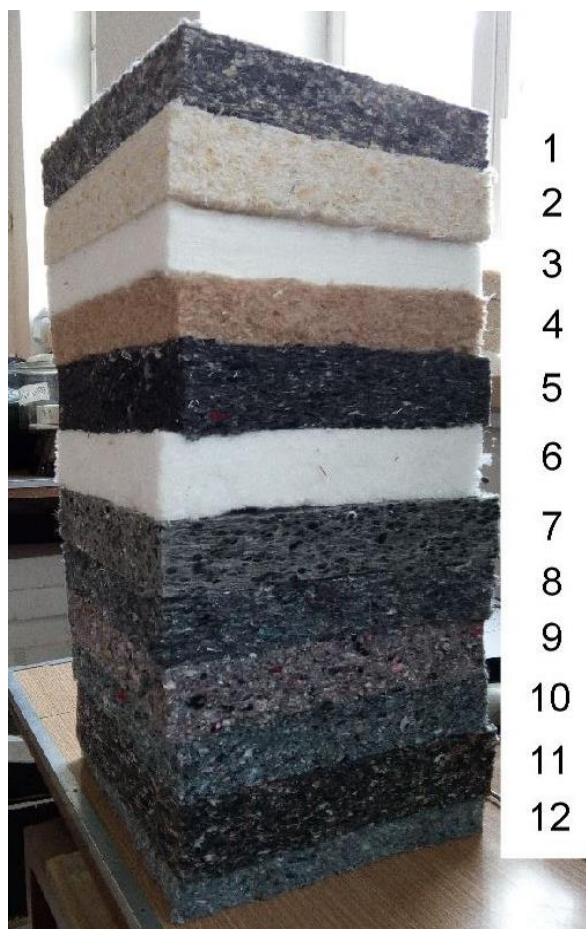
V rámci teoretické části práce byly vybrány jako potencionální zdroje vláken textilní odpady z výroby netkaných textilií, z textilního průmyslu a vyřazené oděvy. Nejvhodnějšími materiály pro výrobu tepelně i akusticko izolačních materiálů byly vyhodnoceny odpadní vlákna z bavlny, lnu a polyesteru. Z odpadních vláken byly navrženy směsi o různém procentuálním zastoupení jednotlivých druhů vláken (složení směsí viz. tabulka 1). Každá směs vždy obsahovala 15 % bikomponentních vláken, kvůli propojení struktury. Pojení probíhalo pomocí horkého vzduchu v teplovzdušných komorách s využitím technologie Air-lay. Zkušební vzorky byly vyrobeny na výrobní lince Bematic ve firmě Retex v Moravském Krumlově. Laboratorní měření bylo provedeno na 12 sadách zkušebních vzorků. Každá sada obsahovala:

- 4 zkušební vzorky o rozměrech 300×300 mm,
- 4 vzorky 200×200 mm,
- 2 vzorky o průměru 100 mm,
- 2 vzorky o průměru 30 mm.

Tabulka 1: Navržené receptury izolačních materiálů

Vzorek	Barva	Složení
1	šedobílá	30% Bavlina 55% PES Rec 15% Bico
2	okrová	40% Bavlina 45% PES 15% Bico
3	bílá	85% PES 15% Bico
4	hnědá	85% Len 15% Bico
5	černá	85% PES 15% BICO
6	bílá	40% Bavlina 45% PES 15% Bico
7	šedá	85% PES 15% Bico
8	modrá	30% Bavlina 55% PES Rec 15% Bico
9	barevná	85% PES 15% Bico
10	modrá	30% Bavlina 55% PES Rec 15% Bico
11	šedobílá	85% PES 15% Bico
12	světle modrá	30% Bavlina 55% PES Rec 15% Bico

Obrázek 4: Označení zkušebních vzorků



10 ZKUŠEBNÍ METODY

Laboratorní měření byla provedena na 12 sadách zkušebních vzorků. U jednotlivých vzorků byly stanoveny fyzikální, tepelně izolační, akustické a mechanické vlastnosti. Jednalo se konkrétně o:

- stanovení tloušťky a lineárních rozměrů,
- stanovení objemové hmotnosti,
- stanovení součinitele tepelné vodivosti,
- stanovení sorpčních vlastností,
- stanovení činitele zvukové pohltivosti,
- stanovení dynamické tuhosti,
- stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky,
- stanovení pevnosti v tlaku resp. napětí při 10% deformaci.

10.1 Stanovení tloušťky a lineárních rozměrů vzorků

V souladu s požadavky norem ČSN EN 822 a ČSN EN 12085 byly stanoveny příčné rozměry zkušebních vzorků. Zkušební vzorky byly umístěny na pevnou rovinnou plochu a změřeny digitálním posuvným měřítkem. [45][45]

Tloušťky zkoušeného materiálu byly zjištěny podle normy ČSN EN 823 metodou číselníkového úchylkoměru s dotykovou deskou. Úchylkoměr s přesností měření nejméně 0,5 mm je uchycen na tuhém rámu, spojeném s tuhou základní deskou pro umístění vzorku. Pomocí této metody lze změřit proměnlivé tloušťky na malých vzdálenostech. Zkouška byla provedena změřením vzdálenosti mezi tvrdým, rovinným, referenčním povrchem, vzorkem a přitlačnou deskou. Deska působila na zkušební vzorek tlakem $(50 \pm 1,5)$ Pa. Metoda je vhodná při zkoušení tuhých, pórovitých i pěnových výrobků. [46]



Obrázek 5: Digitální číselníkový úchylkoměr s dotykovou deskou pro měření tloušťky zkušebních vzorků

10.2 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost zkušebních vzorků byla provedena dle normy ČSN EN 1602. V normě je definována jako hmotnost na jednotku objemu výrobku, včetně všech povrchových kůr vytvořených při výrobě, kromě opláštění nebo povlaku. Zkušební vzorek byl zvážen na laboratorních vahách s přesností na 0,5 % a byly změřeny jeho příčné rozměry i tloušťka. Objemová hmotnost byla stanovena výpočtově, poměrem hmotnosti k součinu příčných rozměrů a tloušťky. [47]

Vyjadřuje se ρ_v [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] a je dána vztahem:

$$\rho_v = \frac{m}{V} \quad (1)$$

m ... hmotnost zkušební vzorku [kg]

V ... objem zkušební vzorku [m^3]

10.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti byl stanoven pomocí stacionární metody desky konkrétně metodou měřidla tepelného toku dle ČSN 72 7012-3, ČSN EN 12667 a ISO 8301. Principem je sledování hustoty tepelného toku pomocí měřidel hustoty tepelného toku umístěných v rovině mezi zkušebním vzorkem a měřicími deskami otápenými na rozdílnou teplotu. Zkušební vzorek byl umístěn mezi dvě desky s teplotním spádem 10 K. Rozměry zkušebních vzorků byly 300 x 300 mm. Pro měření byl použit americký měřicí přístroj Lambda 2300, Holometrix Micromet. [48][49][50]



Obrázek 6: Přístroj Lambda 2300, Holometrix Micromet pro stanovení součinitele tepelné vodivosti

10.4 Stanovení sorpčních vlastností

Stanovení sorpčních vlastností bylo provedeno podle normy ČSN EN ISO 12571. Pro měření byla použita metoda klimatizační komory. Zkušební vzorky byly umístěny do prostředí s konstantní teplotou $23 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkostí 50 %. Další měření bylo provedeno v prostředí s konstantní teplotou $23 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkostí 80 %. Průběžně po více než 24 hodinách byla zkušební tělesa vážena. Vážení bylo opakováno, dokud nebylo dosaženo konstantní hmotnosti. Tedy rozdílu 0,1 % hmotnosti mezi třemi po sobě následujícími váženími. Na základě zjištěných hodnot byly pro sady zkušebních vzorků sestaveny sorpční charakteristiky. [51] Vlhkost u [hm. %] materiálu byla stanovena podle vztahu:

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (2)$$

m ... hmotnost vzorku [kg]

m_0 ... hmotnost suchého vzorku [kg]



Obrázek 7: Klimatizační komora

10.5 Stanovení činitele zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti byl stanoven podle normy ČSN ISO 10534-1. Metoda se používá především ve vývoji nebo ke kontrole materiálů a akustických obkladů. Činitel zvukové pohltivosti se získá ze změřeného maxima a minima akustického tlaku stojaté vlny. Zkouška byla provedena pomocí Kuntovy trubice. Akustická sonda uvnitř trubice se skládá z vozíčku, mikrofonu a sondy. Mikrofonní konec sondy je vzduchotěsně připojen ke komůrce před membránou mikrofonu. Zkoušení je založeno na vytvoření stojatého vlnění, na jejímž konci se nachází zkušební vzorek. Z voltmetru se odečítají napětí kmitně akustického tlaku a v uzlu akustického tlaku. [52] Činitel zvukové pohltivosti α_N se stanoví dle vztahu:

$$\alpha_N = \frac{4}{n + \frac{1}{n} + 2} = \frac{4}{(n+1)^2} \quad (3)$$

$$n = \frac{U_{max}}{U_{min}} \quad (4)$$

U_{max} ... napětí na výstupu voltmetru analyzátoru v kmitně akustického tlaku [mV]

U_{min} ... napětí na výstupu voltmetru analyzátoru v uzlu akustického tlaku [mV]

Zkušební vzorek byl umístěn do kruhového držáku na konci Kuntovy trubice. Musel být do držáku vložen bez jakýchkoliv deformací, tak aby doléhal na dno držáku a na straně druhé byl v rovině konce trubice. Měření se provádělo pomocí generátoru na vhodných kmitočtech. Postupně bylo vždy sledováno maximální a minimální napětí v uzlech akustického tlaku. Měření bylo provedeno na kmitočtech třetinooktávové řady v rozsahu 100-6300 Hz. Z naměřených hodnot byla vyhodnocena podle normy ČSN EN ISO 11654 jednočíslná hodnota váženého činitele zvukové pohltivosti α_w [-], která slouží k snadnějšímu posouzení akustických vlastností. [40]

Tabulka 2: Třída zvukové pohltivosti dle normy ČSN EN ISO 11654 [40]

Třída zvukové pohltivosti	Vážený činitel zvukové pohltivosti α_w [-]
A	0,90; 0,95; 1,00
B	0,80; 0,85
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55
E	0,25; 0,20; 0,15
Neklasifikováno	0,10; 0,05; 0,00



Obrázek 8: Akustický interferometr

10.6 Stanovení dynamické tuhosti

Dynamická tuhost vyjadřuje schopnost materiálu utlumovat mechanické kmity. Je důležitým parametrem v oblasti kročejové neprůzvučnosti. Což je schopnost stavebních prvků nebo částí budov omezovat šíření kročejového zvuku mezi místnostmi. Dynamická tuhost se stanoví dle ČSN ISO 9052-1. [52] Zjistí se z poměru dynamické síly k dynamické výchylce. Při vyhodnocení je nutné nejprve zjistit hodnotu zdánlivé dynamické tuhosti na jednotku plochy s'_t , která je dána vztahem:

$$s'_t = 4 \cdot \pi^2 \cdot m'_t \cdot f_r^2 \quad (5)$$

m'_t ... celková plošná hmotnost zatěžovacího tělesa při zkoušce [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$]

f_r ... extrapolovaná hodnota rezonančního kmitočtu [Hz]

Dynamická tuhost pružného materiálu je závislá na hodnotě stejnosměrného odporu proti proudění v příčném směru dle ISO 9053.

- a) Pro materiál s vysokým odporem proti proudění ($r_{ss} > 100 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$) je dynamická tuhost zkoušeného materiálu rovna hodnotě dynamické tuhosti zdánlivé:

$$s' = s'_t \quad (6)$$

- b) Pro materiál se středním odporem proti proudění je hodnota dynamické tuhosti s' dána vztahem:

$$s' = s'_t + s'_a \quad (7)$$

s'_t ... dynamická tuhost vzorku zdánlivá [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$]

s'_a ... dynamická tuhost vzduchu [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$]

Dynamická tuhost vzduchu ve struktuře vzorku na jednotku plochy s'_a se vypočítá ze vztahu:

$$s'_a = \frac{E_{air}}{d \cdot \varepsilon} \quad (8)$$

E_{air} ... dynamický modul pružnosti vzduchu [Pa]

d ... tloušťka vzorku [m]

ε ... pórovitost vzorku [-]

- c) Pro materiály s nízkým odporem proti proudění ($r_{ss} < 10 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$). Pokud je současně dynamická tuhost vzduchu ve struktuře materiálu stanovena pro $E_{air} = 0,1 \text{ MPa}$ a $\varepsilon = 0,9$, platí:

$$s'_a = \frac{111\,000}{d} \quad (9)$$

$$s' = s'_t \quad (10)$$

Tabulka 3: Kategorie podložky podle dynamické tuhosti dle ČSN 73 0532 [37]

Kategorie podložky	Dynamická tuhost s' [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$]
I. kategorie	\leq
II. kategorie	$30 < s' \leq 200$
III. kategorie	> 200

Dynamická tuhost byla stanovena rezonanční metodou. Při měření byl zjišťován rezonanční kmitočet mechanické soustavy, která se skládala z plošného zkušebního vzorku 200 x 200 mm a ocelové zatěžovací desky. Při zkoušce byla buzena vibrace ve vertikálním směru kolmo na plochu vzorku. Toto buzení bylo prováděno elektromagnetem umístěným na zatěžovací desce a permanentním magnetem nad elektromagnetem. Vzdálenost mezi nimi byla upravena pomocí stavěcího šroubu na hodnotu 0,5 až 2 mm. Celková hmotnost zatěžovací soustavy byla $(8 \pm 0,5)$ kg. Během měření byla postupně zvyšována frekvence na budícím generátoru a hledána rezonanční frekvence, při níž se projevila maximální výchylka na analyzátoru.



Obrázek 9: Měřicí aparatura pro stanovení dynamické tuhosti materiálu

10.7 Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky

Pevnost v tahu kolmo k rovině desky je definována jako podíl největší zaznamenané tahové síly při namáhání tahem kolmo k povrchu výrobku a plochy průřezu zkušebního vzorku. Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky bylo provedeno podle normy ČSN EN 1607. [42]

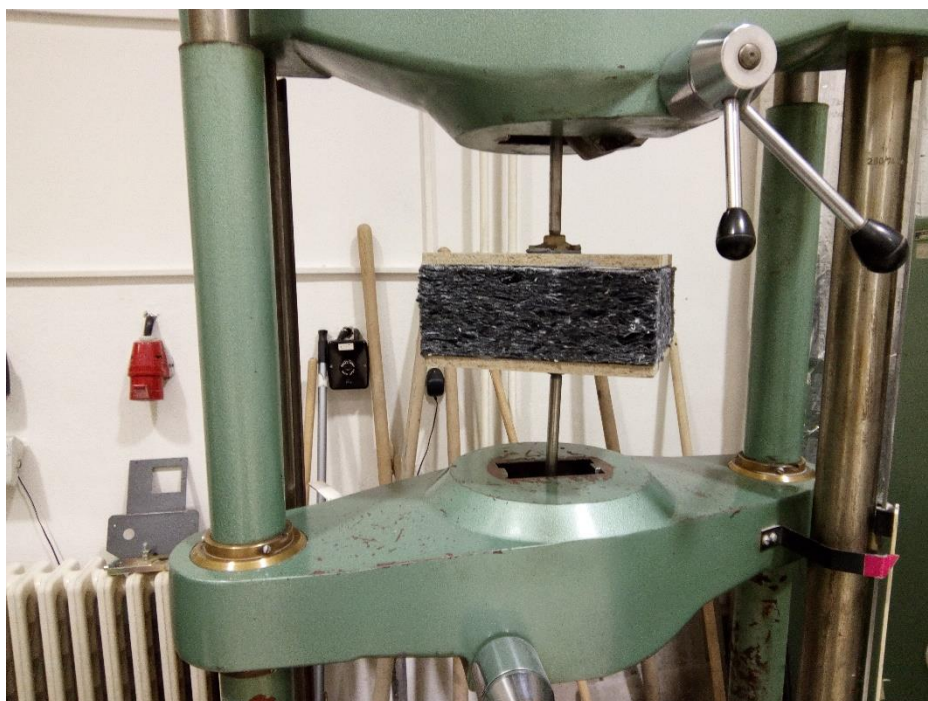
Zkušební vzorek bylo nutné pevně přilepit k dvěma dřevotřískovým deskám, tak aby bylo zabráněno porušení v místě lepidla. K jednotlivým deskám byly rovněž přilepeny terčíky pro snadnější uchycení ve zkušebním lisu. Během zkoušky byla zvyšována tahová síla za konstantní rychlosti až do porušení. Maximální dosažená síla byla zaznamenána. Pevnost v tahu kolmo k rovině desky σ_{mt} [kPa] byla vyhodnocena dle vztahu:

$$\sigma_{mt} = \frac{F_m}{A} = \frac{F_m}{l \cdot b} \quad (11)$$

F_m ... největší tahová síla [kN]

A ... průřezová plocha zkušebního vzorku [m²]

l, b ... délka, šířka zkušebního vzorku [m]



Obrázek 10: Zkušební vzorek upevněný ve zkušebním lisu před zkouškou pevnosti v tahu kolmo k rovině desky

10.8 Stanovení napětí při 10% deformaci

Postup při zkoušení pevnosti v tlaku u tepelně izolačních materiálů je dán v normě ČSN EN 826. [43] Zkouška je založena na působení tlakové síly danou rychlostí na větší rovnoběžné povrchy kvádrového zkušební vzorku. Zkušební vzorek je ve zkušebním lise zatěžován počátečním tlakem 250 ± 10 Pa, jestliže již při tomto zatížení dochází k výrazné deformaci, použije se jako počáteční tlak 50 Pa. Z měření se stanoví tlaková síla přenesená zkušebním vzorkem.

Zkušební vzorek o tloušťce d byl umístěn mezi pevné rovnoběžné desky zkušební lisu a byl zatěžován počátečním tlakem 50 Pa. Po tomto zatížení byla změřena počáteční tloušťka zkušební vzorku d_0 . Poté byl zkušební vzorek postupně stlačován rychlostí $0,1 \text{ d} \cdot \text{min}^{-1}$. V případě, že by byla hodnota maximální síly deformace menší než 10 %, značila by se jako pevnost v tlaku s udáním příslušné deformace. Pokud by nedošlo k žádnému porušení zkušební vzorku před dosažením 10% deformace, výsledkem by byla hodnota napětí v tlaku při 10 % deformaci.

Hodnota napětí při 10% deformaci σ_m [kPa] se vypočte dle vztahu:

$$\sigma_m = \frac{10^3 \cdot F_m}{A_0} \quad (12)$$

F_m ... největší tlaková síla [N]

A_0 ... počáteční průřez zkušební vzorku [m^2]

Poměrné stlačení ε_m [%] se určí ze vztahu:

$$\varepsilon_m = \left(\frac{X_m}{d_0} \right) \cdot 100 \quad (13)$$

X_m ... deformační přetvoření při maximální síle [mm]

d_0 ... počáteční tloušťka zkušební vzorku [mm]

Napětí při 10% deformaci σ_{10} [kPa] se určí ze vztahu:

$$\sigma_{10} = \frac{10^3 \cdot F_{10}}{A_0} \quad (14)$$

F_{10} ... tlaková síla odpovídající 10% poměrnému stlačení [N]

A_0 ... počáteční průřez zkušební vzorku [m^2]

Modul pružnosti v tlaku E [kPa] se stanoví ze vztahu:

$$E = \frac{\sigma_e \cdot d_0}{\chi_e} \quad (15)$$

$$\sigma_e = \frac{10^3 \cdot F_e}{A_0} \quad (16)$$

F_e ... tlaková síla na konci smluvní elastické deformace [N]

χ_m ... stlačení při síle F_e [mm]



Obrázek 11: Měřicí sestava pro stanovení napětí při 10% deformaci

10.9 Multikriteriální hodnocení

Multikriteriální hodnocení se provádí podle většího počtu neporovnatelných kritérií. Při multikriteriálním hodnocení je možné porovnávat nejrůznější hlediska, která nelze vyjádřit kvantitativně, ale jen kvalitativně (slovním popisem). Použití více kritérií umožňuje vzájemně hodnotit alternativy z nejrůznějších hledisek.

Metoda multikriteriálního hodnocení byla využita pro porovnání tepelně i akusticko izolačních materiálů v závislosti na jejich požadavcích při zabudování do konstrukce. Pro výpočet váhy kritérií f_i [-] byla použita metoda kvantitativního párového srovnání. Při určování optimální hodnoty (MAX a MIN) bylo přihlédnuto k použití tepelně i akusticko izolačních materiálů primárně pro vnitřní dělicí konstrukce (lehké příčky), sekundárně potom do obvodových plášťů a šikmých střeš. Podle tepelně izolačních, akustických i mechanických požadavků pro izolační materiály zabudované do konstrukce byla vybrána hodnotící kritéria. Kritéria ve sloupcích byla označena indexem j a kritéria v řádcích i . Výpočet váhy jednotlivých kritérií byl proveden pomocí hodnotící stupnice 1/9 – 1 – 9. V případě 1 - 9 bylo preferované kritérium i před j . Naopak při preferenci j před i bylo použito stupnice 1/9 – 1. Pokud byla kritéria i a j rovnocenná, počet bodů byl roven 1.

Tabulka 4: Hodnocení významnosti jednotlivých kritérií

Počet bodů	Hodnocení významnosti kritérií
1	Kritéria jsou stejně významná
3	První kritérium (i) je slabě významnější než druhé (j)
5	První kritérium (i) je dosti významnější než druhé (j)
7	První kritérium (i) je prokazatelně významnější než druhé (j)
9	První kritérium (i) je absolutně významnější než druhé (j)
2, 4, 6, 8	Mezistupně k jemnějšímu rozlišení preferencí dvojic kritérií

Výpočet váhy kritérií pomocí Sattyho matice byl proveden pomocí uvedených vztahů:

$$S_i = \prod_{j=1}^n s_{ij} \quad R_i = (S_i)^{1/n} \quad f_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (17)$$

s_{ij} ... bodové hodnocení jednotlivých kritérií [-]

S_i ... součet bodových hodnocení jednotlivých kritérií [-]

n ... počet hodnocených kritérií [-]

f_i ... váha kritérií [-]

Výpočtová matice byla vytvořena pomocí následujících vztahů:

$$c_{ij} = F_i \cdot b_{ij} \quad (18)$$

$$\max b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_i)}{\max(a_i) - \min(a_i)} \quad (19)$$

$$\min b_{ij} = \frac{\max(a_i) - a_{ij}}{\max(a_i) - \min(a_i)} \quad (20)$$

11 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

11.1 Stanovení tloušťky

Stanovení tloušťky bylo provedeno podle normy ČSN EN 823. [46] Tloušťka byla měřena na 12 sadách zkušebních vzorků po 8 vzorcích. Měřeny byly zkušební vzorky o rozměrech 300×300 mm a 200×200 mm, vždy 4 zkušební vzorky z každé sady. Pro stanovení tloušťky bylo použito přitlaku dotykové desky 50 Pa. Kromě tloušťky byly stanoveny i příčné rozměry jednotlivých vzorků dle normy ČSN EN 12085. [45] Zkoušky byly provedeny v laboratorním prostředí o teplotě 23°C a relativní vlhkosti 50 %. Jednotlivé vzorky byly měřeny třikrát, v tabulce níže jsou uvedeny průměrné hodnoty tloušťky i příčných rozměrů.

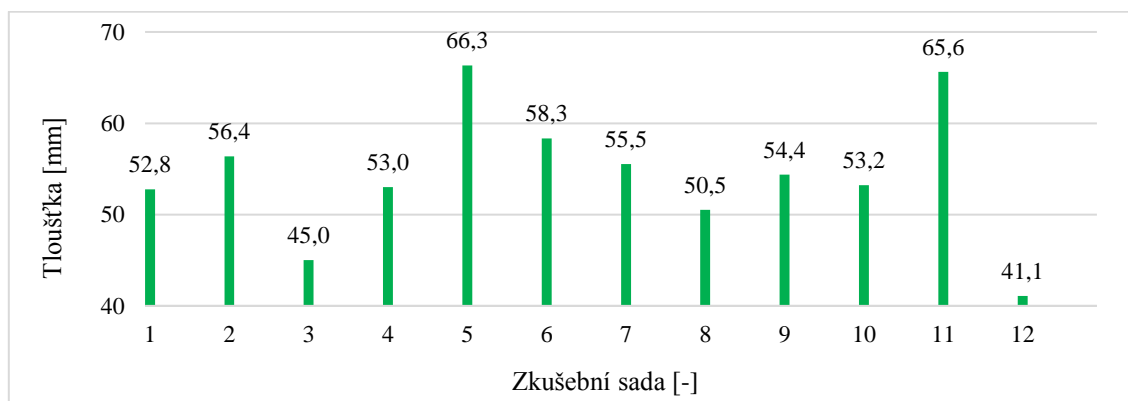
Tabulka 5: Stanovení příčných rozměrů a tloušťky zkušebních vzorků

Vzorek	Označení	Příčné rozměry [mm]		Tloušťka [mm]	Průměrná tloušťka [mm]
1	A	290,57	52,77	52,77	52,8
	B	307,30	52,93	52,93	
	C	291,79	53,37	53,37	
	D	296,16	52,39	52,39	
	E	191,95	53,17	53,17	
	F	199,76	53,29	53,29	
	G	195,24	52,04	52,04	
	H	196,21	52,16	52,16	
2	A	288,69	56,72	56,72	56,4
	B	284,41	58,47	58,47	
	C	296,47	58,28	58,28	
	D	293,52	55,31	55,31	
	E	190,43	56,27	56,27	
	F	192,27	54,08	54,08	
	G	191,77	57,25	57,25	
	H	192,98	54,68	54,68	
3	A	291,14	46,29	46,29	45,0
	B	301,47	44,95	44,95	
	C	283,65	45,86	45,86	
	D	279,86	44,62	44,62	
	E	217,74	44,09	44,09	
	F	202,07	44,64	44,64	
	G	192,54	45,38	45,38	
	H	201,01	44,16	44,16	

Vzorek	Označení	Příčné rozměry [mm]		Tloušťka [mm]	Průměrná tloušťka [mm]
4	A	287,83	53,94	53,94	53,0
	B	283,49	54,17	54,17	
	C	287,64	54,04	54,04	
	D	296,35	51,57	51,57	
	E	190,79	52,32	52,32	
	F	197,76	52,85	52,85	
	G	188,28	52,63	52,63	
	H	199,44	52,48	52,48	
5	A	301,10	66,87	66,87	66,3
	B	300,70	65,22	65,22	
	C	306,76	65,42	65,42	
	D	297,00	65,90	65,90	
	E	203,53	66,67	66,67	
	F	201,66	67,01	67,01	
	G	200,99	67,26	67,26	
	H	186,71	66,34	66,34	
6	A	292,19	58,40	58,40	58,3
	B	292,71	60,37	60,37	
	C	285,80	60,27	60,27	
	D	281,90	58,59	58,59	
	E	192,26	57,00	57,00	
	F	194,00	58,37	58,37	
	G	190,20	56,64	56,64	
	H	198,40	57,02	57,02	
7	A	297,00	56,41	56,41	55,5
	B	303,27	55,48	55,48	
	C	309,90	56,27	56,27	
	D	298,82	55,59	55,59	
	E	206,13	55,07	55,07	
	F	198,60	55,10	55,10	
	G	202,53	54,97	54,97	
	H	193,69	55,25	55,25	
8	A	290,07	51,87	51,87	50,5
	B	299,14	50,95	50,95	
	C	296,24	50,35	50,35	
	D	286,54	51,47	51,47	
	E	200,44	49,53	49,53	
	F	194,71	49,79	49,79	
	G	181,40	50,42	50,42	
	H	197,65	49,81	49,81	

Vzorek	Označení	Příčné rozměry [mm]		Tloušťka [mm]	Průměrná tloušťka [mm]
9	A	295,31	54,78	54,78	54,4
	B	294,09	55,29	55,29	
	C	295,80	54,73	54,73	
	D	294,32	54,81	54,81	
	E	203,63	53,79	53,79	
	F	204,80	54,04	54,04	
	G	188,52	54,10	54,10	
	H	196,73	53,47	53,47	
10	A	291,72	53,82	53,82	53,2
	B	288,36	53,96	53,96	
	C	287,26	52,42	52,42	
	D	287,92	53,49	53,49	
	E	200,29	53,33	53,33	
	F	194,40	53,06	53,06	
	G	197,68	52,78	52,78	
	H	193,31	52,95	52,95	
11	A	294,36	65,56	65,56	65,6
	B	300,03	65,92	65,92	
	C	297,49	66,06	66,06	
	D	298,81	65,47	65,47	
	E	203,23	66,52	66,52	
	F	191,28	65,00	65,00	
	G	195,11	65,00	65,00	
	H	201,43	65,42	65,42	
12	A	277,35	41,67	41,67	41,1
	B	289,37	42,94	42,94	
	C	280,32	40,66	40,66	
	D	282,79	41,97	41,97	
	E	192,12	39,96	39,96	
	F	192,75	40,13	40,13	
	G	202,88	42,14	42,14	
	H	196,75	39,09	39,09	

Graf 1: Přehled tlouštěk izolačních materiálů



11.2 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost byla vyhodnocena podle normy ČSN EN 1602. [47] Měření bylo provedeno na 12 sadách zkušebních vzorků po 8 vzorcích o rozměrech 300×300 mm a 200×200 mm. Zkouška byla uskutečněna v laboratorních podmínkách za teploty 23°C a relativní vlhkosti 50 %.

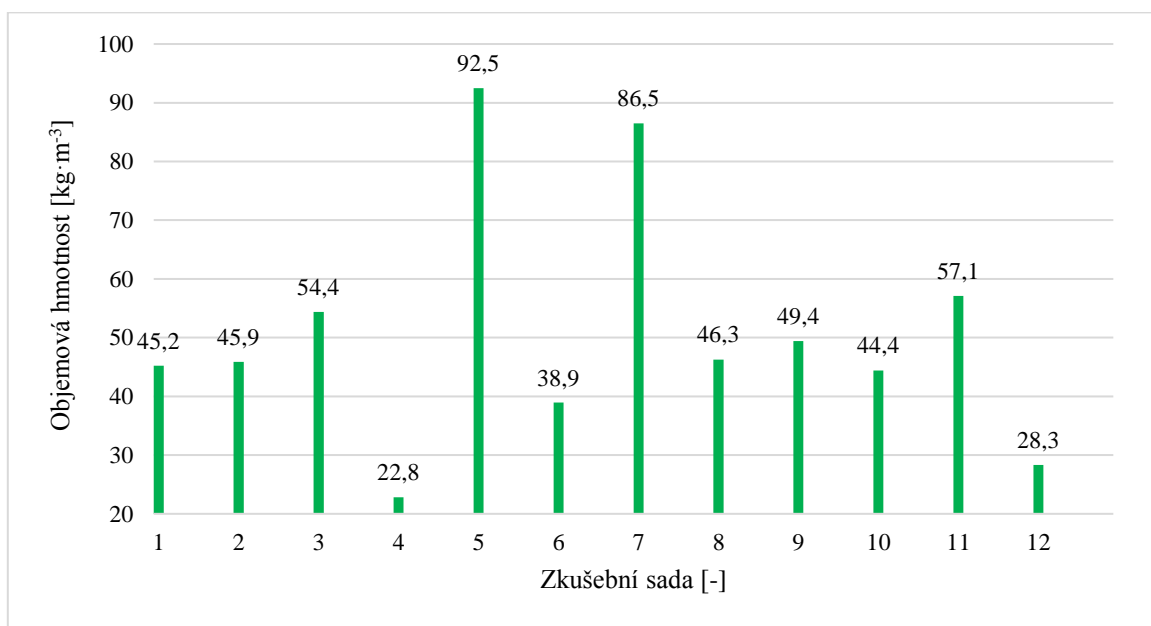
Tabulka 6: Stanovení objemové hmotnosti zkušebních vzorků

Vzorek	Označení	Tloušťka [mm]	Příčné rozměry [mm]		Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Průměrná objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
1	A	52,77	290,57	296,37	204,32	45,0	45,2
	B	52,93	307,30	295,85	206,82	43,0	
	C	53,37	291,79	302,28	210,08	44,6	
	D	52,39	296,16	291,89	198,98	43,9	
	E	53,17	191,95	193,91	94,73	47,9	
	F	53,29	199,76	197,51	97,69	46,5	
	G	52,04	195,24	186,55	88,00	46,4	
	H	52,16	196,21	202,53	91,96	44,4	
2	A	56,72	288,69	304,02	213,68	42,9	45,9
	B	58,47	284,41	297,44	224,46	45,4	
	C	58,28	296,47	292,97	236,04	46,6	
	D	55,31	293,52	299,25	220,59	45,4	
	E	56,27	190,43	191,40	94,50	46,1	
	F	54,08	192,27	216,25	102,06	45,4	
	G	57,25	191,77	191,69	98,25	46,7	
	H	54,68	192,98	190,60	97,56	48,5	
3	A	46,29	291,14	281,91	193,88	51,0	54,4
	B	44,95	301,47	285,61	214,23	55,4	
	C	45,86	283,65	285,88	192,38	51,7	
	D	44,62	279,86	294,72	207,76	56,5	
	E	44,09	217,74	183,85	101,73	57,6	
	F	44,64	202,07	220,70	104,51	52,5	
	G	45,38	192,54	194,56	88,39	52,0	
	H	44,16	201,01	185,08	95,72	58,3	
4	A	53,94	287,83	303,07	103,16	21,9	22,8
	B	54,17	283,49	292,81	99,96	22,2	
	C	54,04	287,64	294,07	101,60	22,2	
	D	51,57	296,35	291,50	100,45	22,5	
	E	52,32	190,79	191,25	42,92	22,5	
	F	52,85	197,76	192,31	48,59	24,2	
	G	52,63	188,28	194,96	44,41	23,0	
	H	52,48	199,44	189,49	47,86	24,1	

Vzorek	Označení	Tloušťka [mm]	Příčné rozměry [mm]		Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Průměrná objemová hmotnost [kg·m ⁻³]
5	A	66,87	301,10	294,21	562,54	95,0	92,5
	B	65,22	300,70	290,11	496,11	87,2	
	C	65,42	306,76	302,38	540,02	89,0	
	D	65,90	297,00	298,06	526,17	90,2	
	E	66,67	203,53	205,00	276,90	99,5	
	F	67,01	201,66	202,30	239,48	87,6	
	G	67,26	200,99	201,15	256,40	94,3	
	H	66,34	186,71	205,07	246,61	97,1	
6	A	58,40	292,19	293,73	195,37	39,0	38,9
	B	60,37	292,71	300,53	203,95	38,4	
	C	60,27	285,80	298,65	186,46	36,2	
	D	58,59	281,90	294,71	176,78	36,3	
	E	57,00	192,26	193,43	86,82	41,0	
	F	58,37	194,00	199,89	90,44	40,0	
	G	56,64	190,20	203,49	89,38	40,8	
	H	57,02	198,40	193,34	87,27	39,9	
7	A	56,41	297,00	295,73	437,20	88,2	86,5
	B	55,48	303,27	300,32	434,50	86,0	
	C	56,27	309,90	303,28	451,20	85,3	
	D	55,59	298,82	308,00	467,76	91,4	
	E	55,07	206,13	203,34	183,17	79,4	
	F	55,10	198,60	204,18	199,28	89,2	
	G	54,97	202,53	205,26	207,37	90,7	
	H	55,25	193,69	209,75	183,66	81,8	
8	A	51,87	290,07	291,93	198,91	45,3	46,3
	B	50,95	299,14	295,51	210,96	46,8	
	C	50,35	296,24	301,18	205,09	45,7	
	D	51,47	286,54	295,88	200,84	46,0	
	E	49,53	200,44	188,04	83,25	44,6	
	F	49,79	194,71	204,69	95,19	48,0	
	G	50,42	181,40	196,12	85,08	47,4	
	H	49,81	197,65	188,33	86,18	46,5	
9	A	54,78	295,31	293,66	232,45	48,9	49,4
	B	55,29	294,09	299,55	234,73	48,2	
	C	54,73	295,80	292,64	241,87	51,1	
	D	54,81	294,32	295,24	237,76	49,9	
	E	53,79	203,63	198,32	104,91	48,3	
	F	54,04	204,80	197,12	110,74	50,8	
	G	54,10	188,52	205,19	105,00	50,2	
	H	53,47	196,73	196,17	98,82	47,9	

Vzorek	Označení	Tloušťka [mm]	Příčné rozměry [mm]		Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Průměrná objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
10	A	53,82	291,72	290,96	192,55	42,2	44,4
	B	53,96	288,36	295,30	208,27	45,3	
	C	52,42	287,26	294,69	192,34	43,3	
	D	53,49	287,92	296,03	211,81	46,5	
	E	53,33	200,29	193,92	92,24	44,5	
	F	53,06	194,40	200,84	91,81	44,3	
	G	52,78	197,68	202,62	93,02	44,0	
	H	52,95	193,31	208,64	96,65	45,3	
11	A	65,56	294,36	301,20	338,49	58,2	57,1
	B	65,92	300,03	295,15	328,47	56,3	
	C	66,06	297,49	298,85	328,67	56,0	
	D	65,47	298,81	295,07	338,58	58,7	
	E	66,52	203,23	212,78	160,35	55,7	
	F	65,00	191,28	200,04	144,58	58,1	
	G	65,00	195,11	200,42	146,65	57,7	
	H	65,42	201,43	212,81	157,14	56,0	
12	A	41,67	277,35	296,91	94,32	27,5	28,3
	B	42,94	289,37	296,01	102,65	27,9	
	C	40,66	280,32	287,20	94,20	28,8	
	D	41,97	282,79	298,11	94,46	26,7	
	E	39,96	192,12	202,04	44,42	28,6	
	F	40,13	192,75	205,89	44,39	27,9	
	G	42,14	202,88	189,67	49,03	30,2	
	H	39,09	196,75	193,93	43,29	29,0	

Graf 2: Přehled objemových hmotností izolačních materiálů



11.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti a sorpčních vlastností

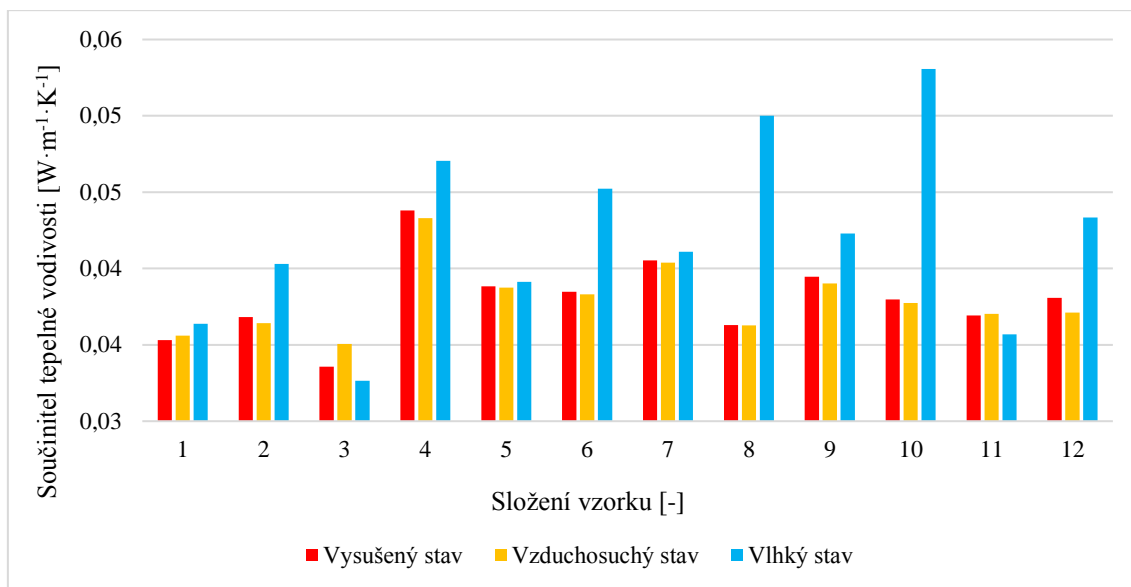
Součinitel tepelné vodivosti zkušebních vzorků byl stanoven dle normy ČSN 72 7012-3, ČSN EN 12667 a ISO 8301. [48][49][50] Zkouška byla uskutečněna na 12 sadách zkušebních vzorků po 4 vzorcích o rozměrech 300 × 300 mm. Měření součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno na zkušebních vzorcích ve vysušeném, vzduchosuchém a vlhkém stavu. Nejprve byly vzorky vysušeny při 70°C do konstantní hmotnosti. Dále byly vzorky ponechány v laboratorním prostředí (vzduchosuchý stav) s teplotou 23°C a relativní vlhkostí 50% (ustálení vlhkosti proběhlo v klimatické komoře). Nakonec byly vzorky kondicionovány v prostředí s teplotou +23°C a relativní vlhkostí 80%. Po ustálení hmotnosti zkušebních vzorků v jednotlivých stavech bylo provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti. Měření probíhala při střední teplotě +10°C na dvou zkušebních vzorcích. Výstupem měření byly vždy tři hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Výsledné hodnoty uvedené v tabulce níže jsou vždy celkové průměry za oba vzorky.

Sorpční vlastnosti zkušebních vzorků byly stanoveny dle ČSN EN ISO 12571 v rámci přípravy vzorků pro stanovení součinitele tepelné vodivosti (viz. výše) [51]. Na závěr byla zjištěna vlhkost materiálu.

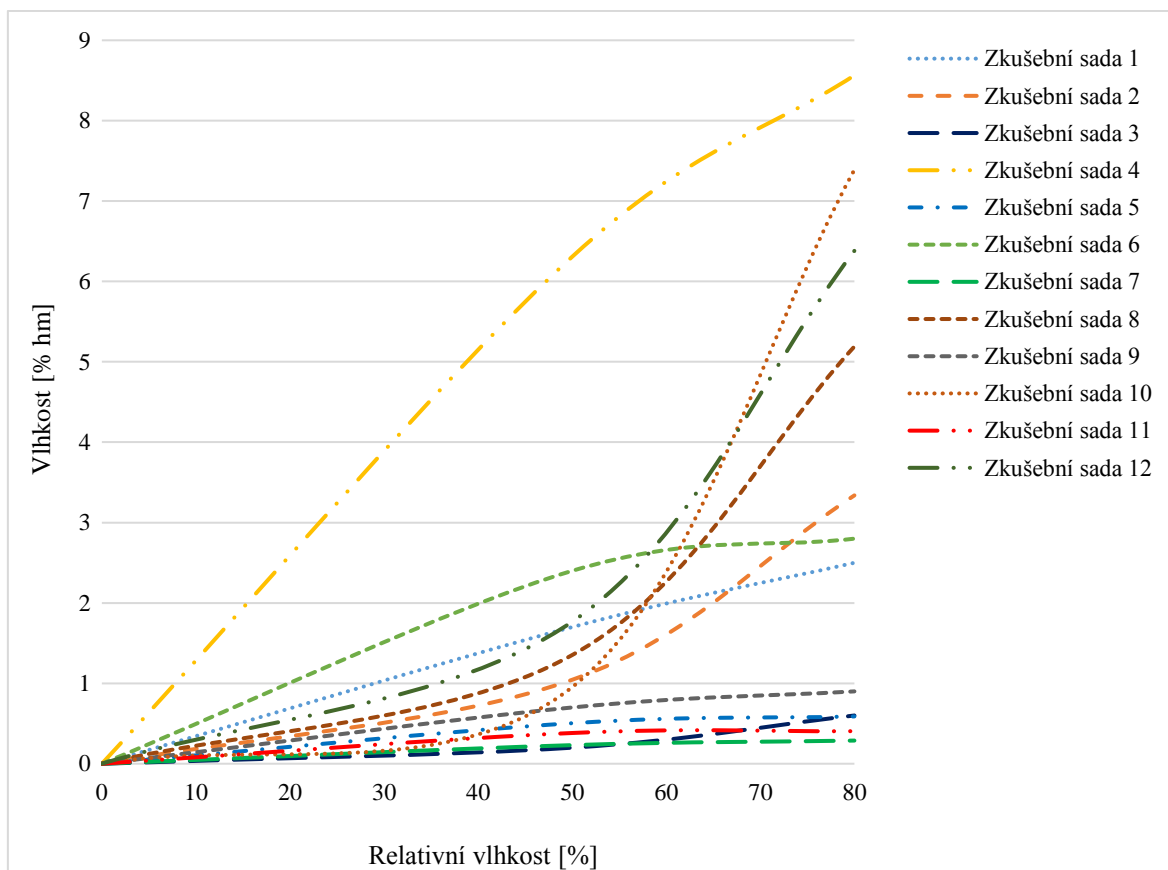
Tabulka 7: Stanovení součinitele tepelné vodivosti zkušebních vzorků ve vysušeném, vzduchosuchém a vlhkém stavu

Vzorek	Vysušený stav				Vzduchosuchý stav				23°C ; 80% RH			
	Tloušťka [mm]	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Vlhkost [% hm]	Součinitel tepelné vodivosti [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Tloušťka [mm]	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Vlhkost [% hm]	Součinitel tepelné vodivosti [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Tloušťka [mm]	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Vlhkost [% hm]	Součinitel tepelné vodivosti [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
1	50,1	44,6	0,0	0,0353	50,0	43,9	2,5	0,0356	51,6	44,0	1,7	0,0364
2	50,5	45,4	0,0	0,0368	50,1	45,4	1,0	0,0364	54,5	44,2	3,3	0,0403
3	50,4	51,7	0,0	0,0336	50,0	56,5	0,6	0,0351	50,6	51,0	0,2	0,0326
4	49,4	22,5	0,0	0,0438	48,4	22,5	6,3	0,0433	48,1	22,2	8,6	0,0470
5	63,3	89,0	0,0	0,0388	63,1	90,2	0,5	0,0388	61,6	87,2	0,6	0,0391
6	50,2	36,3	0,0	0,0385	50,1	36,3	2,8	0,0383	60,8	38,4	2,4	0,0452
7	54,2	91,4	0,0	0,0405	53,9	91,4	0,2	0,0404	52,9	88,2	0,3	0,0411
8	50,0	46,0	0,0	0,0363	49,6	46,0	1,4	0,0363	50,0	46,8	5,2	0,0500
9	50,8	49,9	0,0	0,0395	53,0	49,9	0,9	0,0390	50,0	48,2	0,7	0,0423
10	53,5	46,5	0,0	0,0380	51,8	46,5	1,0	0,0377	50,3	45,3	7,4	0,0531
11	65,6	58,7	0,0	0,0369	64,9	58,7	0,4	0,0370	61,7	56,3	0,4	0,0357
12	44,5	26,7	0,0	0,0381	36,5	26,7	1,8	0,0371	43,2	27,9	6,4	0,0433

Graf 3: Přehled hodnot součinitele tepelné vodivosti izolačních materiálů ve vysušeném, vzduchosuchém a vlhkém stavu



Graf 4: Sorpční izotermy - závislost vlhkosti izolačních materiálů na relativní vlhkosti prostředí



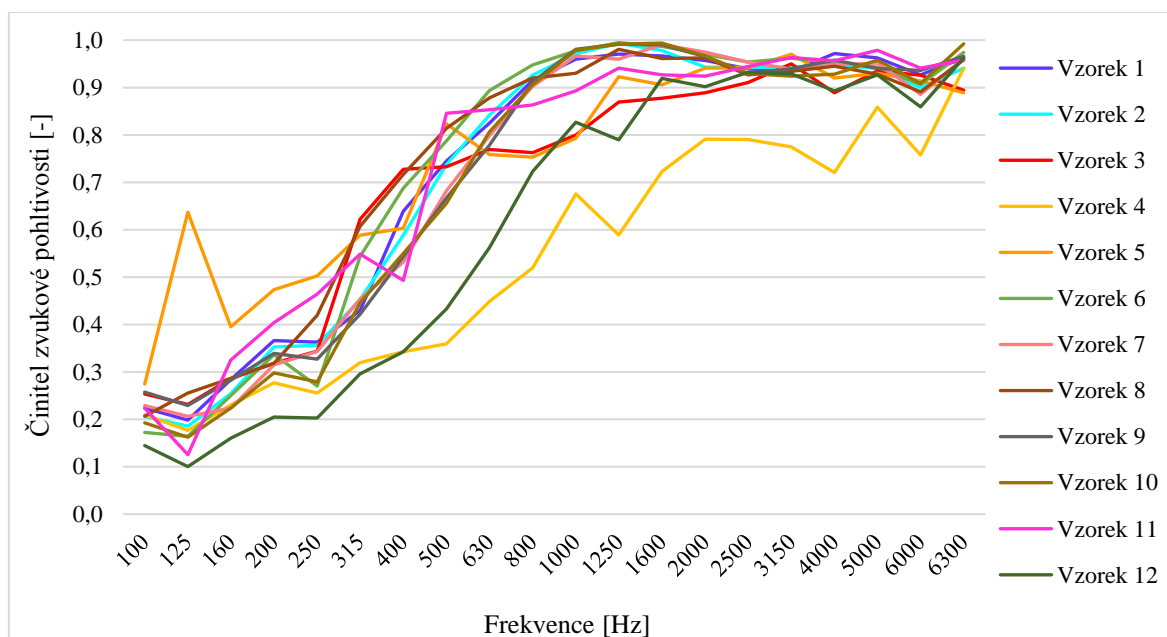
11.4 Stanovení činitele zvukové pohltivosti

Měření činitele zvukové pohltivosti bylo provedeno podle normy ČSN ISO 10534-1 v jednotlivých třetinooktávových pásmech od 100 Hz do 6300 Hz. [39] Z naměřených hodnot byly vyhodnoceny jednočíselné hodnoty charakterizující akustické vlastnosti zkušebních vzorků v oblasti zvukové pohltivosti dle ČSN EN ISO 11654. [40] Zkouška byla provedena na 12 sadách zkušebních vzorků po 2 vzorcích o průměru 100 mm a 2 vzorcích o průměru 30 mm. V průběhu měření byla laboratorní teplota 23°C.

Tabulka 8: Stanovení váženého činitele zvukové pohltivosti zkušebních vzorků a zařazení do třídy zvukové pohltivosti dle ČSN EN ISO 11654

Vzorek	Vážený čísel zvukové pohltivosti [-]	Třída zvukové pohltivosti [-]
1	0,60	C
2	0,60	C
3	0,60	C
4	0,40	D
5	0,70	C
6	0,55	D
7	0,55	D
8	0,60	C
9	0,55	D
10	0,55	D
11	0,65	C
12	0,40	D

Graf 5: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci

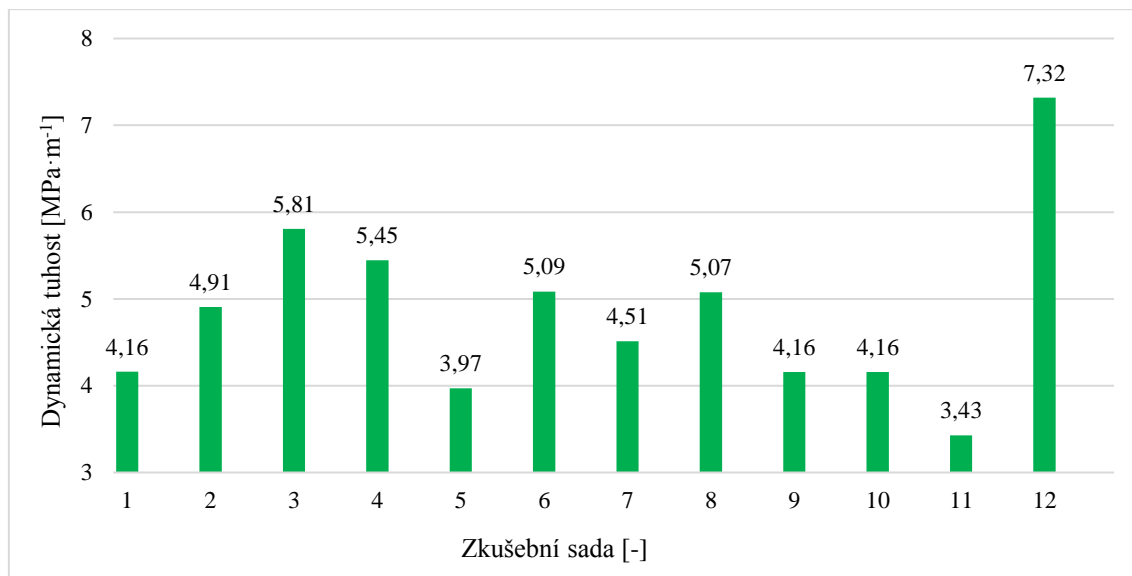


11.5 Stanovení dynamické tuhosti

Dynamická tuhost byla stanovena dle ČSN ISO 9052-1. [52] Měření bylo provedeno na 12 sadách zkušebních vzorků po 3 vzorcích o rozměrech 200×200 mm. Zkušební vzorky byly změřeny v laboratorním prostředí o teplotě 23°C a relativní vlhkosti 50 %. Při každém měření byla pomocí stavěcího šroubu upravena vzdálenost mezi elektromagnety na hodnotu 0,5 až 2 mm. Nakonec byly výsledky zaříděny dle ČSN 73 0532 do příslušné kategorie. [37]

Tabulka 9: Stanovení dynamické tuhosti zkušebních vzorků a zařazení do kategorie podložky dle ČSN 73 0532

Vzorek	Tloušťka vzorku [mm]	Hodnota rezonančního kmitočtu [Hz]	Zdánlivá dynamická tuhost [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$]	Dynamická tuhost vzduchu ve struktuře vzorku [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$]	Dynamická tuhost [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$]	Průměrná dynamická tuhost [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$]	Kategorie podložky
1	44,81	14	1,60	2,48	4,07	4,16	I. kategorie
	41,85	14	1,60	2,65	4,25		
	43,31	14	1,60	2,56	4,16		
2	34,96	17	2,36	3,17	5,53	4,91	I.kategorie
	40,87	15	1,83	2,72	4,55		
	39,60	15	1,83	2,80	4,64		
3	28,22	14	1,60	3,93	5,53	5,81	I.kategorie
	25,48	15	1,83	4,36	6,19		
	25,71	13	1,38	4,32	5,70		
4	28,73	15	1,83	3,86	5,70	5,45	I.kategorie
	31,00	14	1,60	3,58	5,18		
	30,59	15	1,83	3,63	5,46		
5	61,75	17	2,36	1,80	4,15	3,97	I.kategorie
	62,31	16	2,09	1,78	3,87		
	61,79	16	2,09	1,80	3,88		
6	37,91	17	2,36	2,93	5,28	5,09	I.kategorie
	38,63	16	2,09	2,87	4,96		
	37,95	16	2,09	2,92	5,01		
7	51,57	18	2,64	2,15	4,79	4,51	I.kategorie
	52,01	17	2,36	2,13	4,49		
	51,28	16	2,09	2,16	4,25		
8	35,03	15	1,83	3,17	5,00	5,07	I.kategorie
	35,02	15	1,83	3,17	5,00		
	32,81	15	1,83	3,38	5,22		
9	43,92	14	1,60	2,53	4,13	4,16	I.kategorie
	44,77	14	1,60	2,48	4,08		
	41,50	14	1,60	2,67	4,27		
10	41,19	14	1,60	2,70	4,29	4,16	I.kategorie
	42,94	13	1,38	2,58	3,96		
	42,36	14	1,60	2,62	4,22		
11	57,72	14	1,60	1,92	3,52	3,43	I.kategorie
	58,27	13	1,38	1,91	3,28		
	58,88	14	1,60	1,89	3,48		
12	21,68	17	2,36	5,12	7,48	7,32	I.kategorie
	24,76	17	2,36	4,48	6,84		
	22,23	18	2,64	4,99	7,64		

Graf 6: Přehled dynamických tuhostí izolačních materiálů

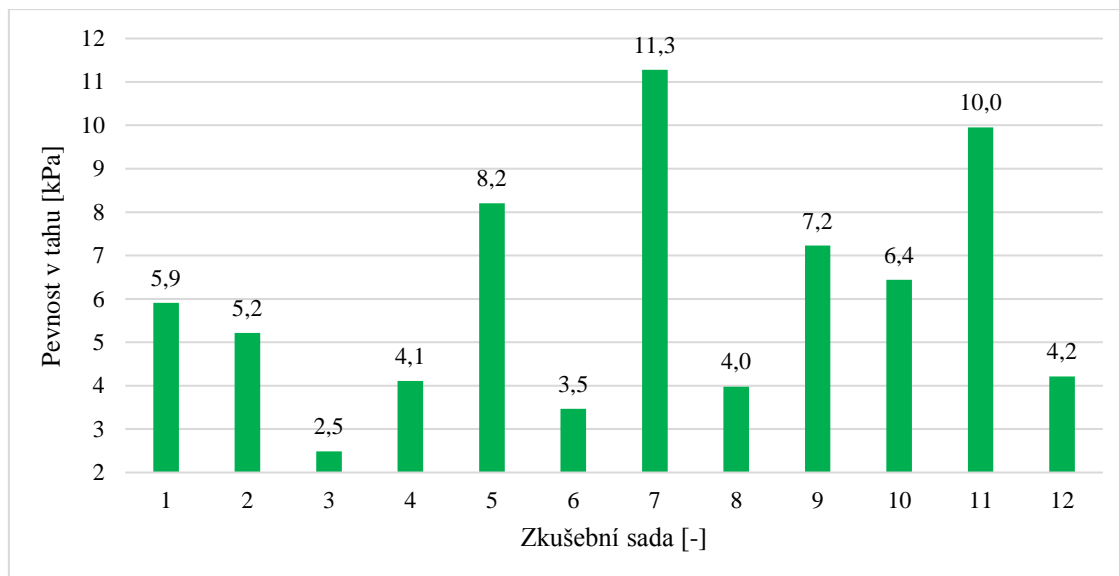
11.6 Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky

Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky bylo provedeno dle ČSN EN 1607 na 12 zkušebních vzorcích o rozměrech 200 × 200 mm. [42] Ke každému z nich byly přilepeny dřevotřískové desky lepidlem Sikadur -30 Normal (lepidlo na bázi epoxidové pryskyřice) a terčíky pro uchycení do zkušebního lisu. Během zkoušky byla postupně zvyšována tahová síla za konstantní rychlosti až do porušení. Pomocí zaznamenané maximální síly byla vyhodnocena pevnost v tahu kolmo k rovině desky.

Tabulka 10: Stanovení pevnosti kolmo k rovině desky na zkušebních vzorcích

Vzorek	Příčné rozměry [mm]		Síla [kN]	Pevnost v tahu [kPa]
1	191,95	193,91	0,22	5,9
2	190,43	191,40	0,19	5,2
3	201,02	200,23	0,10	2,5
4	190,79	191,25	0,15	4,1
5	200,53	200,58	0,33	8,2
6	201,42	200,41	0,14	3,5
7	200,05	199,48	0,45	11,3
8	200,44	188,04	0,15	4,0
9	200,41	200,26	0,29	7,2
10	200,29	193,92	0,25	6,4
11	200,56	200,43	0,40	10,0
12	200,57	201,12	0,17	4,2

Graf 7: Přehled pevností v tahu kolmo k rovině desky izolačních materiálů



11.7 Stanovení pevnosti v tlaku (napětí při 10% deformaci)

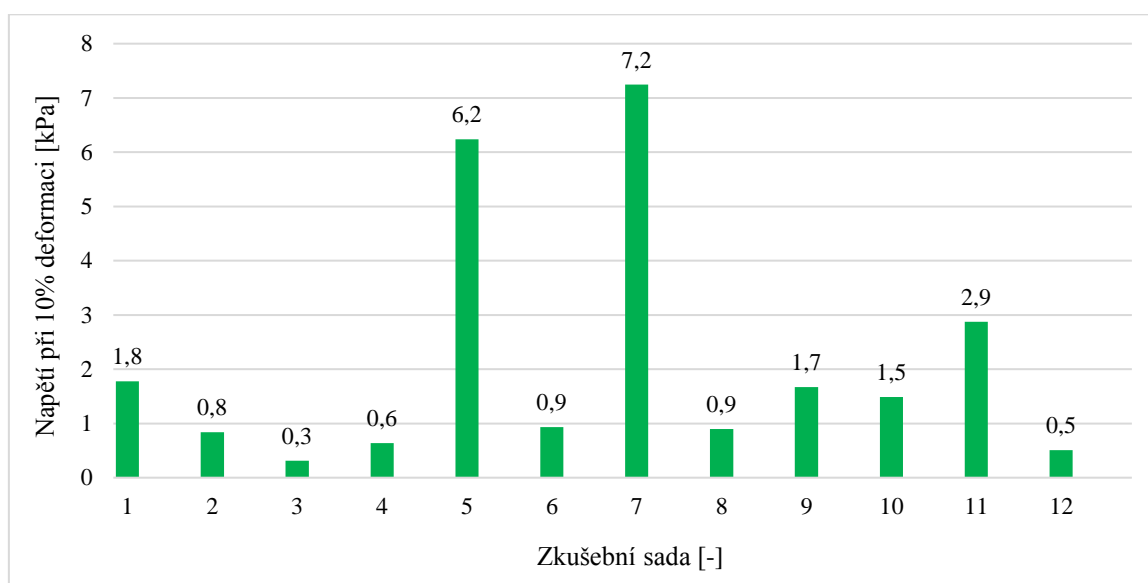
Pevnost v tlaku byla stanovena podle normy ČSN EN 826. [43] Měření bylo provedeno na 12 sadách zkušebních vzorků po 3 vzorcích o rozměrech 200×200 mm. Jelikož byly tyto vzorky pružné a nedošlo by u nich k porušení, nelze zjistit hodnotu pevnosti v tlaku. Z toho důvodu bylo sledováno napětí při 10% deformaci. Vzorek byl vždy po vložení do zkušebního lisu zatížen počátečním tlakem 50 Pa a byla změřena jeho tloušťka při tomto zatížení.

Tabulka 11: Stanovení napětí při 10% deformaci na zkušebních vzorcích

Vzorek	Příčné rozměry [mm]		Síla při počátečním stlačení [N]	10% deformace [mm]	Síla při 10% deformaci [N]	Napětí při 10% deformaci [kPa]	Průměrné napětí při 10% deformaci [kPa]
1	199,76	197,51	2,0	5,41	75,1	1,90	1,78
	195,24	186,55	1,8	5,32	58,3	1,60	
	196,21	202,53	2,0	5,28	72,6	1,83	
2	192,27	216,25	2,1	6,09	22,1	0,53	0,84
	191,77	191,69	1,8	5,87	42,3	1,15	
	192,98	190,60	1,8	5,72	30,5	0,83	
3	202,07	220,70	2,2	5,60	16,0	0,36	0,31
	192,54	194,56	1,9	6,48	10,6	0,28	
	201,01	185,08	1,9	6,47	10,7	0,29	
4	197,76	192,31	1,9	5,88	19,1	0,50	0,64
	188,28	194,96	1,8	5,45	28,9	0,79	
	199,44	189,49	1,9	5,58	23,4	0,62	

Vzorek	Příčné rozměry [mm]		Síla při počátečním stlačení [N]	10% deformace [mm]	Síla při 10% deformaci [N]	Napětí při 10% deformaci [kPa]	Průměrné napětí při 10% deformaci [kPa]
5	201,66	202,30	2,0	6,76	203,8	5,00	6,24
	200,99	201,15	2,0	6,75	273,9	6,77	
	186,71	205,07	1,9	6,66	266,0	6,95	
6	194,00	199,89	1,9	5,90	50,9	1,31	0,93
	190,20	203,49	1,9	6,10	27,1	0,70	
	198,40	193,34	1,9	6,06	29,8	0,78	
7	198,60	204,18	2,0	5,53	342,6	8,45	7,25
	202,53	205,26	2,1	5,51	324,7	7,81	
	193,69	209,75	2,0	5,56	222,7	5,48	
8	194,71	204,69	2,0	5,26	36,6	0,92	0,89
	181,40	196,12	1,8	5,41	31,8	0,89	
	197,65	188,33	1,9	5,25	32,4	0,87	
9	204,80	197,12	2,0	5,49	63,2	1,57	1,67
	188,52	205,19	1,9	5,51	70,4	1,82	
	196,73	196,17	1,9	5,43	63,0	1,63	
10	194,40	200,84	2,0	5,39	66,4	1,70	1,48
	197,68	202,62	2,0	5,45	53,4	1,33	
	193,31	208,64	2,0	5,40	57,2	1,42	
11	191,28	200,04	1,9	6,56	110,2	2,88	2,87
	195,11	200,42	2,0	6,58	111,1	2,84	
	201,43	212,81	2,1	6,60	124,1	2,90	
12	192,75	205,89	2,0	4,53	19,7	0,50	0,50
	202,88	189,67	1,9	4,47	21,8	0,57	
	196,75	193,93	1,9	4,46	17,2	0,45	

Graf 8: Přehled napětí při 10% deformaci izolačních materiálů



11.8 Ekonomické zhodnocení

Zkušební vzorky byly vytvořeny převážně ze syntetických a recyklovaných bavlněných vláken. Jedna z dvanácti sad zkušebních vzorků byla tvořena recyklovanými lněnými vlákny. Každý materiál obsahoval bikomponentní vlákna v množství 15 %, aby došlo k propojení mezi vlákny.

Tabulka 12: Druhy a ceny vláken použité při výrobě zkušebních vzorků

Druh vláken	Cena vláken [Kč·kg ⁻¹]
Recyklovaná lněná vlákna	22,95
Recyklovaná bavlněná vlákna	13,50
Syntetická vlákna	17,55
Pojivová BICO vlákna	39,15

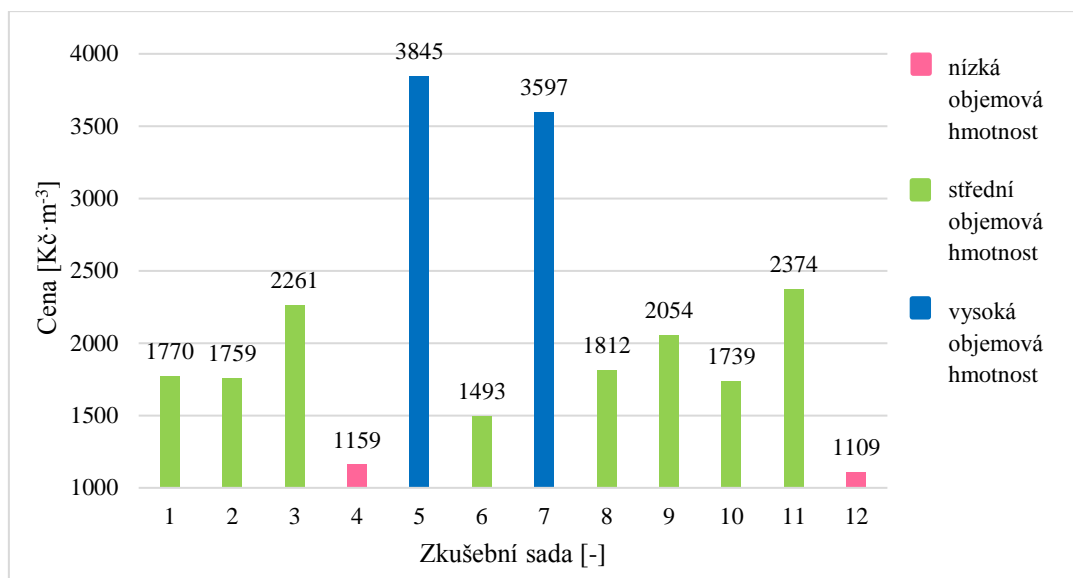
Aby bylo možné srovnat jednotlivé zkušební vzorky s materiály běžně dostupnými na trhu, musely být rozříděny podle objemové hmotnosti:

- materiály o nízké objemové hmotnosti – zkušební vzorky 4, 12,
- materiály o střední objemové hmotnosti – zkušební vzorky 1, 2, 3, 6, 8, 9, 10, 11,
- materiály o vysoké objemové hmotnosti – zkušební vzorky 5, 7.

Tabulka 13: Ceny zkoumaných materiálů na bázi textilních vláken

Objemová hmotnost	Vzorek	Barva	Složení	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Součinitel tepelné vodivosti ve vysušeném stavu [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Cena [Kč·kg ⁻¹]	Cena [Kč·m ⁻³]
nízká	4	hnědá	85% Len 15% Bico	22,8	0,043	25,38	1159
	12	světle modrá	30% Bavlina 55% PES Rec 15% Bico	28,3	0,037	19,58	1109
střední	1	šedobílá	30% Bavlina 55% PES Rec 15% Bico	45,2	0,035	19,58	1770
	2	okrová	40% Bavlina 45% PES 15% Bico	45,9	0,037	19,17	1759
	3	bílá	85% PES 15% Bico	54,4	0,034	20,79	2261
	6	bílá	40% Bavlina 45% PES 15% Bico	38,9	0,038	19,17	1493
	8	modrá	30% Bavlina 55% PES Rec 15% Bico	46,3	0,036	19,58	1812
	9	barevná	85% PES 15% Bico	49,4	0,039	20,79	2054
	10	modrá	30% Bavlina 55% PES Rec 15% Bico	44,4	0,038	19,58	1739
	11	šedobílá	85% PES 15% Bico	57,1	0,037	20,79	2374
vysoká	5	černá	85% PES 15% BICO	92,5	0,039	20,79	3845
	7	šedá	85% PES 15% Bico	86,5	0,041	20,79	3597

Graf 9: Přehled cen izolačních materiálů



Ve výsledných cenách tepelně i akusticko izolačních materiálu je zakomponovaná doprava vláken do výrobního závodu, cena výroby, balení, skladování a další související náklady. K jednotlivým skupinám materiálů byly na základě provedeného průzkumu vybrány materiály běžně dostupné na trhu na bázi minerální vlny.

Tabulka 14: Ceny běžně dostupných vláknitých tepelně izolačních materiálů na trhu

Objemová hmotnost	Název	Materiál	Použití	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Součinitel tepelné vodivosti [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Cena [Kč·m ⁻³]
nízká	Isover MULTIPLAT 35	skelná vlna	příčky, střechy	15	0,035	2592
střední	Isover ORSET	čedičová vlna	příčky, střechy	30	0,038	4392
	Isover AKU	čedičová vlna	příčky	40	0,035	2640
vysoká	Isover N	čedičová vlna	podlahy	100	0,036	6832

Při porovnání cen izolačních materiálů o nízké objemové hmotnosti byly izolace z textilních vláken jednoznačně levnější než skelná izolace Isover MULTIPLAT 35. Ceny izolací na bázi odpadních textilních vláken o nízké objemové hmotnosti se pohybovaly do 1200 Kč·m⁻³, na rozdíl od ceny skelné izolace 2592 Kč·m⁻³. Při srovnání materiálů o střední objemové hmotnosti byla opět dražší izolace Isover AKU za 2640 Kč·m⁻³ oproti izolacím z textilních vláken, jejichž ceny se pohybovaly v rozmezí 1493 - 2374 Kč·m⁻³. Nejvyšší cenový rozdíl byl pozorován u kategorie o vysoké objemové hmotnosti. Ceny materiálů z textilních vláken byly výrazně nižší 3597 Kč·m⁻³ a 3845 Kč·m⁻³ než cena 6832 Kč·m⁻³ izolace Isover N z čedičových vláken.

11.9 Multikriteriální hodnocení

Optimalizace byla provedena pomocí multikriteriálního srovnání. Pro vyjádření váhy kritérií f_i [-] byla použita metoda kvantitativního párového srovnání neboli Sattyho maticí. Při určování optimální hodnoty (MAX a MIN) bylo přihlédnuto k použití tepelně i akusticko izolačních materiálů jako výplňové izolace primárně pro vnitřní dělicí konstrukce (lehké příčky), sekundárně potom do obvodových plášťů a šikmých střeš. Posuzovanými kritérii byly vlastnosti tepelně izolační, akustické i mechanické.

Tabulka 15: Hodnotící kritéria a požadavky na jejich optimum

číslo	Kritéria	Optimum pro použití v příčkách a střeších
1	Objemová hmotnost ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	Min
2	Součinitel tepelné vodivosti ve vysušeném stavu λ_s [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	Min
3	Vážený činitel zvukové pohltivosti α_w [-]	Max
4	Dynamická tuhost s' [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$]	Min
5	Pevnost v tahu kolmo k rovině desky σ_{mt} [kPa]	Max
6	Napětí při 10% deformaci σ_m [kPa]	Max
7	Cena [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$]	Min

Tabulka 16: Rozhodovací matice z parametry zkoušených materiálů

Kritéria	Zkušební sady											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	45,2	45,9	54,4	22,8	92,5	38,9	86,5	46,3	49,4	44,4	57,1	28,3
λ_s [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	0,035	0,037	0,034	0,044	0,039	0,038	0,041	0,036	0,039	0,038	0,037	0,038
α_w [-]	0,60	0,60	0,60	0,40	0,70	0,55	0,55	0,60	0,55	0,55	0,65	0,40
s' [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$]	4,2	4,9	5,8	5,4	4,0	5,1	4,5	5,1	4,2	4,2	3,4	7,3
σ_{mt} [kPa]	5,9	5,2	2,5	4,1	8,2	3,5	11,3	4,0	7,2	6,4	10,0	42,1
σ_m [kPa]	1,8	0,8	0,3	0,6	6,2	0,9	7,2	0,9	1,7	1,5	2,9	0,5
Cena [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$]	1770	1759	2261	1159	3845	1493	3597	1812	2054	1739	2374	1109

Tabulka 17: Sattyho matice

číslo	1	2	3	4	5	6	7	S_i	R_i	F_i
1	1	1/7	1/8	2	2	1/5	1/4	5,7179	1,2829	0,1292
2	7	1	1/2	8	8	2	4	30,5000	1,6295	0,1641
3	8	2	1	9	9	4	6	39,0000	1,6877	0,1699
4	1/2	1/8	1/9	1	1	1/5	1/5	3,1361	1,1774	0,1185
5	1/2	1/8	1/9	1	1	1/4	1/5	3,1861	1,1800	0,1188
6	5	1/2	1/4	5	4	1	1/2	16,2500	1,4893	0,1500
7	4	1/4	1/6	5	5	1/2	1	15,9167	1,4849	0,1495
suma								113,7067	9,9316	1,0000

Tabulka 18: Výpočtová matice tepelně i akusticko izolačních materiálů z textilních vláken pro aplikaci jako výplňové izolace ve vnitřních nebo obvodových konstrukcích

Kritéria	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ρ [kg·m ⁻³]	8,8	8,6	7,1	12,9	0,0	9,9	1,1	8,6	8,0	8,9	6,6	11,9
λ_s [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	13,6	11,2	16,4	0,0	8,0	8,5	5,3	12,0	7,0	9,4	11,1	9,2
α_w [-]	11,3	11,3	11,3	0,0	17,0	8,5	8,5	11,3	8,5	8,5	14,2	0,0
s' [MPa·m ⁻¹]	9,6	7,4	4,6	5,7	10,2	6,8	8,6	6,8	9,6	9,6	11,9	0,0
σ_{mt} [kPa]	4,6	3,7	0,0	2,2	7,7	1,3	11,9	2,0	6,4	5,3	10,1	2,3
σ_m [kPa]	3,2	1,1	0,0	0,7	12,8	1,3	15,0	1,3	2,9	2,5	5,5	0,4
Cena [Kč·m ⁻³]	11,3	11,4	8,7	14,7	0,0	12,9	1,4	11,1	9,8	11,5	8,0	15,0
Suma	62,5	54,8	48,1	36,2	55,7	49,3	51,6	53,2	52,2	55,8	67,3	38,8

Multikriteriální porovnání bylo zaměřeno na oblast použití tepelně i akusticko izolačních materiálů z textilních vláken jako výplňové izolace pro použití do vnitřních nebo obvodových konstrukcí. Nejdůležitější vlastností zkoumaných materiálů byla zvuková pohltivost a druhou vlastností hodnota součinitele tepelné vodivosti. Dalšími hodnocenými vlastnostmi byly v pořadí napětí při 10% deformaci, cena, objemová hmotnost, pevnost v tahu kolmo k rovině desky a dynamická tuhost. Na základě požadovaných vlastností byl vyhodnocen jako nejvhodnější materiál pro dané použití zkušební vzorek 11 tvořený 85 % polyesterových a 15 % bikomponentních vláken o objemové hmotnosti 57,1 kg·m⁻³. Druhým nejlepším vzorkem dle hodnocení byl vzorek 1 z 30 % bavlněných, 55 % recyklovaných polyesterových a 15 % bikomponentních vláken o objemové hmotnosti 45,2 kg·m⁻³.

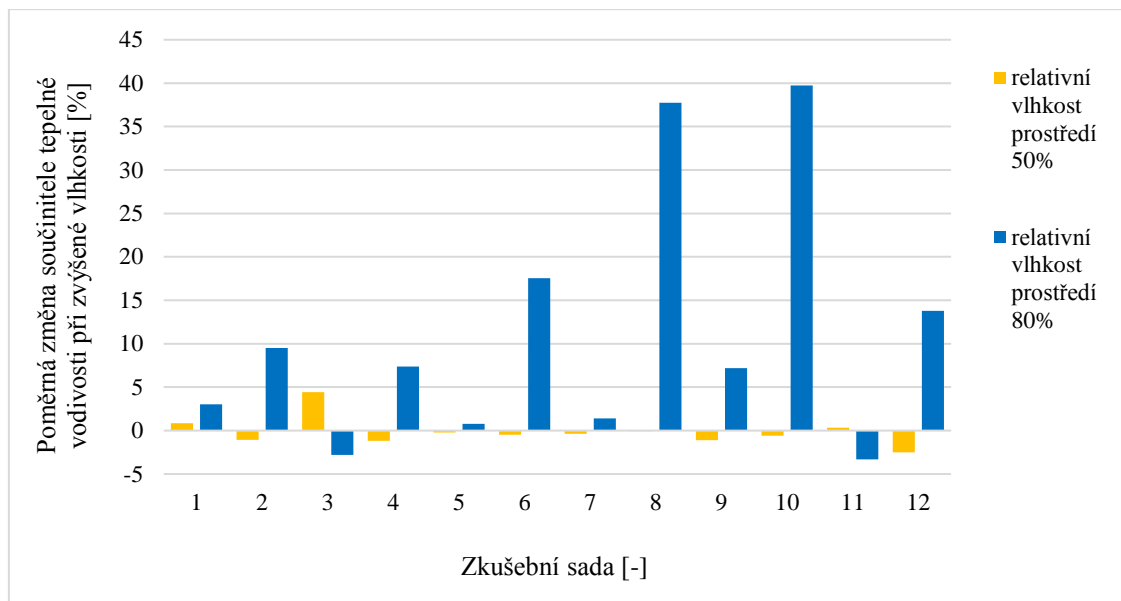
12 Diskuze výsledků

V rámci teoretické části práce byly vytipovány jako potencionální zdroje vláken textilní odpady z výroby netkaných textilií, z textilního průmyslu a z vyřazených oděvů. Následně byly vybrány vhodné druhy odpadních textilních vláken na bázi bavlny, lnu a polyesteru. Z odpadních vláken bylo navrženo 12 receptur pro výrobu tepelně i akusticko izolačních materiálů. Receptury obsahovaly různé procentuálním zastoupení jednotlivých druhů vláken vždy s obsahem 15 % bikomponentních vláken. Výroba izolantů probíhala teplovzdušným pojením pomocí horkého vzduchu v teplovzdušných komorách s využitím technologie Air-lay. Experimentální část práce byla provedena měřeními na 12 sadách zkušebních vzorků na bázi textilních vláken. Jednotlivé zkušební sady se mezi sebou lišily objemovou hmotností a složením vláken.

Tloušťky zkušebních vzorků se pohybovaly kolem 50 mm. Nejnižší tloušťky byly naměřeny u vzorků 3 (45 mm) a 12 (41,1 mm), naopak nejvyšší u vzorků 5 (66,3 mm) a 11 (65,6 mm). Rozdílné tloušťky vzorků byly způsobeny nastavením výrobní linky při prototypové výrobě, kdy je při malém objemu výrobků obtížné přesně regulovat tloušťku. Vzorky byly dle naměřené objemové hmotnosti zařazeny do skupin o nízké, střední a vysoké objemové hmotnosti. Do skupiny o nízké objemové hmotnosti patřily vzorky 4 a 12, jejichž objemová hmotnost byla od 20 - 30 kg·m⁻³. Do střední byla zařazena většina vzorků (1, 2, 3, 6, 8, 9, 10 a 11) o objemové hmotnosti od 38 - 58 kg·m⁻³ a do vysoké vzorky 5 a 7 o objemové hmotnosti 86 - 93 kg·m⁻³.

V oblasti tepelně izolačních vlastností bylo provedeno u zkušebních vzorků stanovení součinitele tepelné vodivosti ve vysušeném stavu, za laboratorních podmínek (teplota 23°C v přítomnosti relativní vlhkosti 50%) a za zvýšené vlhkosti (teplota 23°C a relativní vlhkost 80%). Nejlepších tepelně izolačních vlastností dosáhl vzorek 3 (85 % PES, 15 % Bico) o objemové hmotnosti 51 kg·m⁻³. Vykazoval stabilní hodnoty součinitele tepelné vodivosti ve všech uvedených stavech a nízkou citlivost k vlhkosti. Součinitel tepelné vodivosti byl naměřen v rozmezí 0,033 - 0,035 W·m⁻¹·K⁻¹. Dále pak dobrých tepelně izolačních vlastností dosáhly zkušební vzorky 1 a 11. U vzorku 1 (30 % bavlna, 55 % PES Rec, 15 % Bico) byly zjištěny hodnoty součinitele tepelné vodivosti 0,035 - 0,036 W·m⁻¹·K⁻¹ a u vzorku 11 (85 % PES, 15 % Bico) 0,036 - 0,037 W·m⁻¹·K⁻¹. U zkušebních vzorků 2, 5, 7 a 9 byly naměřeny průměrné a stabilní hodnoty součinitele tepelné vodivosti ve vysušeném stavu mezi 0,037 - 0,039 W·m⁻¹·K⁻¹, za laboratorních podmínek (za teploty 23°C a relativní vlhkosti 80%) 0,036 - 0,039 W·m⁻¹·K⁻¹ a za teploty 23°C s relativní vlhkostí 80% 0,039 - 0,042 W·m⁻¹·K⁻¹.

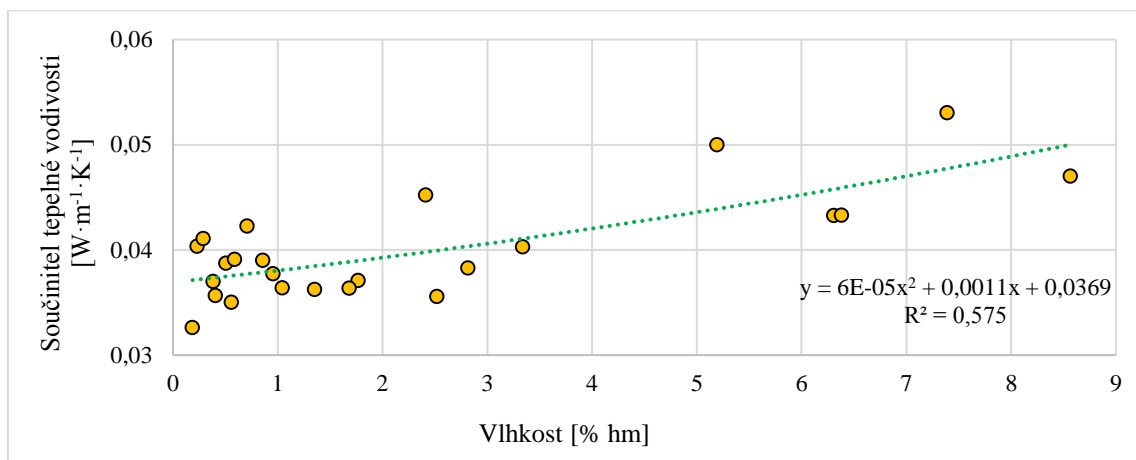
Graf 10: Poměrná změna součinitele tepelné vodivosti při zvýšené vlhkosti



K výrazné degradaci tepelně izolačních vlastností vlivem sorpční vlhkosti došlo u zkušebních vzorků 6, 8 a 12 (viz. graf 10). U vzorku 6 (40 % bavlna, 45 % PES Rec, 15 % Bico) se hodnota součinitele tepelné vodivosti zvýšila z $0,038 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ na $0,045 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ se sorpční vlhkostí 2,4 % hm, u vzorku 8 (30 % bavlna, 55 % PES Rec, 15 % Bico) z $0,036 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ na $0,050 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ se sorpční vlhkostí 5,2 % hm a u vzorku 12 (30 % bavlna, 55 % PES Rec, 15 % Bico) z $0,037 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ na $0,043 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ se sorpční vlhkostí 6,4 % hm. Nejhorší hodnota součinitele tepelné vodivosti ve vlhkém stavu byla naměřena u vzorku 10 (30 % bavlna, 55 % PES Rec, 15 % Bico) $0,053 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ s obsahem vlhkosti 7,4 % hm. Největší nárůst vlhkosti byl pozorován vzorku 4 (85 % len, 15 % Bico), kde byla naměřena hodnota vlhkosti ve zkušebním vzorku 8,6 % hm. Součinitel tepelné vodivosti se zvýšil z $0,043 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ na $0,047 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Záporné hodnoty v grafu 10 byly způsobeny mírnými rozdíly tloušťky a objemové hmotnosti jednotlivých vzorků zkušebních sad. Jelikož se jedná o vláknennou strukturu materiálů, mohly vzniknout rozdílné tloušťky i objemová hmotnost již při výrobě např. při kladením vláken do vrstev, přitlakem kaladrovacích válců za teplovzdušnou komorou. Což způsobilo kolísání hodnoty součinitele tepelné vodivosti ve stavech o teplotě 23°C s relativními vlhkostmi 50% a 80%.

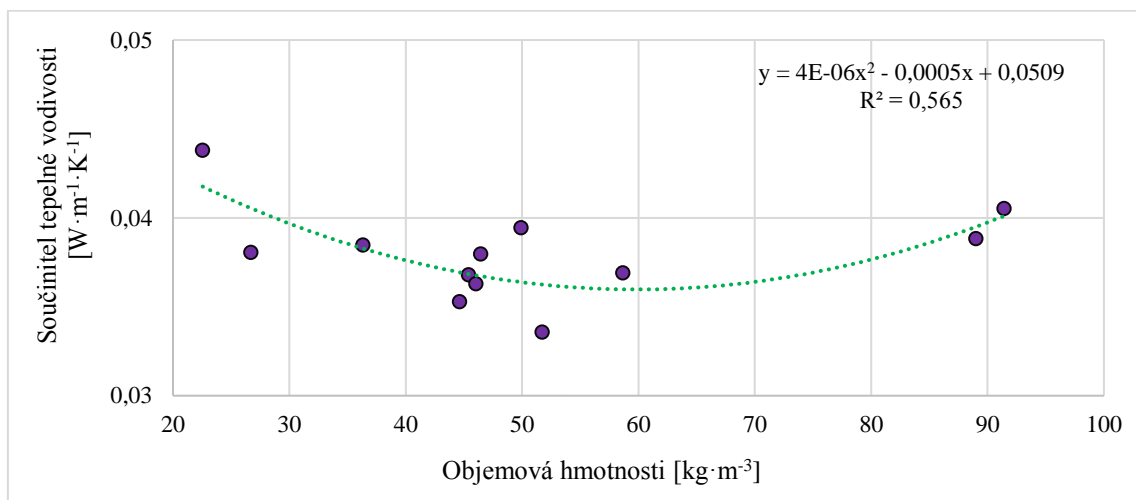
Z naměřených výsledků lze usoudit, že materiály obsahující přírodní vlákna jsou citlivější na vlhkost v prostředí. Nejvyšší citlivost vykazují lněná vlákna (zkušební sada 4). Bavlněná vlákna také způsobují značnou citlivost na vlhkost (zkušební sada 1, 2, 6, 8, 10, 12). Nejméně citlivá jsou vlákna syntetická (zkušební sada 3, 5, 7, 9, 11).

Graf 11: Závislost součinitele tepelné vodivosti na sorpční vlhkosti v izolačních materiálech na bázi textilních vláken



Z naměřených výsledků je patrné, že s přibývajícím sorpční vlhkostí dochází ke zvýšení hodnoty součinitele tepelné vodivosti. U materiálů na bázi přírodních vláken dochází k degradaci tepelně izolačních vlastností.

Graf 12: Závislost součinitele tepelné vodivosti ve vysušeném stavu na objemové hmotnosti izolačních materiálů na bázi textilních vláken



Součinitel tepelné vodivosti a objemová hmotnost byly měřeny na 12 zkušebních sadách tepelně i akusticko izolačních materiálů z odpadních textilních vláken. Z jejich naměřených hodnot byl sestaven graf 11. Ze závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti vyplývá, že objemová hmotnost má vliv na hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Z tohoto důvodu se jeví optimálním rozsah objemové hmotnosti 40 - 65 kg·m⁻³ pro získání co nejnižší hodnoty součinitele tepelné vodivosti.

Akustické vlastnosti materiálů byly zmapovány pomocí činitele zvukové pohltivosti a dynamické tuhosti. Z naměřených hodnot činitele zvukové pohltivosti byla stanovena jednočíselná hodnota činitele zvukové pohltivosti neboli vážený činitel zvukové pohltivosti. Zkušební vzorky byly zatříděny do tříd zvukové pohltivosti C (vzorky 1, 2, 3, 5, 8 a 11) nebo do třídy D (4, 6, 7, 9, 10 a 12). Hodnoty váženého činitele zvukové pohltivosti se pohybovaly mezi 0,4 - 0,7. Nejvyšší hodnota váženého činitele zvukové pohltivosti 0,7 byla naměřena u zkušební vzorku 5 (85 % PES, 15 % Bico) o nejvyšší tloušťce, a zároveň nejvyšší objemové hmotnosti. Naopak nejnižší hodnotu váženého činitele zvukové pohltivosti měl vzorek 4 (85 % len, 15 % Bico) o nejnižší objemové hmotnosti a střední tloušťce (53 mm). Z měření vyplývá, že hodnota váženého činitele zvukové pohltivosti závisí na tloušťce a objemové hmotnosti akusticko izolačního materiálu. V oblasti dynamické tuhosti spadají všechny zkušební vzorky do I. kategorie podložky. Zkušební vzorky vykazovaly nízké hodnoty dynamické tuhosti v rozmezí 3,43-7,32 MPa·m⁻¹. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u vzorků 5 a 11 (85 % PES, 15 % Bico) do 4 MPa·m⁻¹, dále u vzorků 1, 2, 7, 9, 10 do 5 MPa·m⁻¹, u vzorků 3, 4, 6, 8 do 6 MPa·m⁻¹ a u vzorku 12 (30 % bavlna, 55 % PES Rec, 15 % Bico) byla nejvyšší hodnota dynamické tuhosti 7,32 MPa·m⁻¹. Z naměřených hodnot je zjevné, že nejlepšími kročejovými izolacemi se jeví vzorky 5 a 11 o nejvyšších tloušťkách a vysoké objemové hmotnosti.

Mechanické vlastnosti zkušebních vzorků byly zastoupeny pevností v tahu kolmo k rovině desky a napětím při 10% deformaci. Pevnosti v tahu kolmo k rovině desky se pohybovaly v rozpětí 2,5-11,3 kPa. Nejnižší pevnost v tahu kolmo k rovině desky byla naměřena u vzorku 3 (85 % PES, 15 % Bico) 2,5 kPa a nejvyšší u vzorku 7 (85 % PES, 15 % Bico) 11,3 kPa. U většiny vzorků (1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12) byly naměřeny nízké hodnoty napětí při 10% deformaci 0,031-2,87 kPa. Nejvyšší napětí bylo zjištěno u vzorku 5 (85 % PES, 15 % Bico) 6,24 kPa a u vzorku 7 (85 % PES, 15 % Bico) 7,25 kPa.

Pro lepší srovnání cen tepelně i akusticko izolačních materiálů byly roztrženy podle objemových hmotností skupin o nízké, střední a vysoké objemové hmotnosti. Ceny materiálů o nízké objemové hmotnosti, tedy zkušební vzorek 4 (85 % len, 15 % Bico) a 12 (30 % bavlna, 55 % PES Rec, 15 % Bico), se pohybují do 1200 Kč·m⁻³. U skupiny o střední objemové hmotnosti jsou ceny v rozmezí od 1493 - 2374 Kč·m⁻³. Nejdražšími materiály jsou vzorky 5 a 7 (85 % PES, 15 % Bico) patřící do skupiny o vysoké objemové hmotnosti. U vzorku 7 je cena výrobku 3597 Kč·m⁻³ a u vzorku 5 dokonce 3845 Kč·m⁻³. Z ekonomického zhodnocení vyplývá, že čím má materiál vyšší objemovou hmotnost, tedy obsahuje více vláken a je hutnější, tím je také cena výrobku vyšší.

Při porovnání cen izolačních materiálů o nízké objemové hmotnosti byly izolace z textilních vláken jednoznačně levnější než skelná izolace Isover MULTIPLAT 35. Ceny izolací na bázi odpadních textilních vláken o nízké objemové hmotnosti se pohybovaly do $1200 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-3}$, na rozdíl od ceny skelné izolace $2592 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-3}$. Při srovnání materiálů o střední objemové hmotnosti byla opět dražší izolace Isover AKU za $2640 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-3}$ oproti izolacím z textilních vláken, jejichž ceny se pohybovaly v rozmezí $1493 - 2374 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-3}$. Nejvyšší cenový rozdíl byl pozorován u kategorie o vysoké objemové hmotnosti. Ceny materiálů z textilních vláken byly výrazně nižší $3597 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-3}$ a $3845 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-3}$ než cena $6832 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-3}$ izolace Isover N z čedičových vláken. Ve srovnání s vláknitými izolačními materiály na bázi minerální vlny dosáhly zkoumané materiály z textilních vláken příznivějších cen a srovnatelně nízkých hodnot součinitele tepelné vodivosti. Na základě provedeného průzkumu lze konstatovat, že vyvíjené tepelně i akusticko izolační materiály z odpadních textilních vláken jsou schopné konkurovat izolačním materiálům běžně dostupným na trhu.

Multikriteriální porovnání bylo zaměřeno na oblast použití tepelně i akusticko izolačních materiálů z textilních vláken jako výplňové izolace pro použití do vnitřních nebo obvodových konstrukcí. Stěžejní vlastností těchto materiálů byla zvuková pohltivost a druhou důležitou vlastností hodnota součinitele tepelné vodivosti. Dalšími hodnocenými vlastnostmi byly v pořadí napětí při 10% deformaci, cena, objemová hmotnost, pevnost v tahu kolmo k rovině desky a dynamická tuhost. Na základě požadovaných vlastností byl vyhodnocen jako nejvhodnější materiál pro dané použití zkušební vzorek 11 tvořený 85 % polyesterových a 15 % bikomponentních vláken o objemové hmotnosti $57,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Druhým nejlepším vzorkem dle hodnocení byl vzorek 1 z 30 % bavlněných, 55 % recyklovaných polyesterových a 15 % bikomponentních vláken o objemové hmotnosti $45,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Oba zkoumané materiály dosahovaly poměrně vysokých hodnot váženého činitele zvukové pohltivosti zkušební vzorek 11 – 0,65 a vzorek 1 – 0,6. Hodnota součinitele tepelné vodivosti byla u vzorku 1 nižší $0,035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a u vzorku 11 – $0,037 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Výhodou obou materiálů však byly jejich stabilní hodnoty součinitele tepelné vodivosti i za zvýšené vlhkosti prostředí.

13 Závěr

Diplomová práce byla věnována možnostem vývoje tepelně i akusticko izolačních materiálů z textilních vláken. Cílem byl návrh vhodného zdroje textilních vláken, který by bylo možné využít pro výrobu tepelných izolací s co nejlepšími tepelně izolačními vlastnostmi. Práce se zabývala výběrem potencionálně vhodných surovin a návrhem technologie výroby izolačních rohoží.

Pro výrobu tepelně i akusticko izolačních materiálů byly vybrány zdroje vláken pocházející z odpadů při textilní výrobě, výrobě netkaných textilií a z vyřazeného textilu. Z textilních odpadů byla získána lněná, bavlněná a polyesterová vlákna. Následně bylo navrženo 12 receptur o různém procentuálním zastoupení vláken vždy s obsahem bikomponentních vláken. Zkušební sady vzorků byly zhotoveny metodou termického pojení s využitím technologie Air-lay. Lišily se mezi sebou objemovou hmotností a složením vláken. Pro porovnání jednotlivých zkušebních sad vzorků byly vyhodnoceny tepelně izolační, akustické a mechanické vlastnosti.

Tepelně izolační vlastnosti byly reprezentovány součinitelem tepelné vodivosti ve vysušeném stavu, za laboratorních podmínek (teplota 23°C v přítomnosti relativní vlhkosti 50%) a za zvýšené vlhkosti (teplota 23°C a relativní vlhkost 80%). U zkušebních vzorků byly naměřeny nízké hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Zkoumané materiály dosáhly hodnot plně srovnatelných s tepelně i akusticko izolačními materiály běžně dostupnými na trhu. Nejlepší tepelně izolační vlastnosti vykazovala zkušební sada 3 tvořená 85 % polyesterových a 15 % bikomponentních vláken s objemovou hmotností 51 kg·m⁻³. Dosahovala stabilních hodnot součinitele tepelné vodivosti a nedocházelo zde k degradaci tepelně izolačních vlastností vlivem vlhkosti. Součinitel tepelné vodivosti byl naměřen v rozmezí 0,033 - 0,035 W·m⁻¹·K⁻¹. Poměrně dobrých součinitelů tepelné vodivosti bylo naměřeno i u zkušebních vzorků ze sady 1 a 11. U zkušební sady 1 složené z 30 % bavlněných, 55 % recyklovaných polyesterových a 15 % bikomponentních vláken byly naměřeny hodnoty v rozmezí 0,035 - 0,036 W·m⁻¹·K⁻¹ v závislosti na vlhkosti a u sady 11 tvořené 85 % polyesterových a 15 % bikomponentních vláken 0,036 - 0,037 W·m⁻¹·K⁻¹.

U zkušebních vzorků ze syntetických vláken došlo vlivem vlhkosti k mírnému zhoršení tepelně izolačních vlastností. Na rozdíl od zkušebních vzorků s podílem přírodních vláken (bavlny, lnu), kde byla pozorována vyšší sorpční vlhkost spolu s výraznější degradací tepelně izolačních vlastností. Největší nárůst vlhkosti byl pozorován u zkušební sady 4 z 85 % lněných a 15 % bikomponentních vláken, kde byla naměřena hodnota vlhkosti ve zkušebním vzorku 8,6 % hm. Součinitel tepelné vodivosti se zvýšil z $0,043 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ na $0,047 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Nejhorší hodnota součinitele tepelné vodivosti ve vlhkém stavu byla naměřena u zkušební sady 10 tvořené 30 % bavlněných, 55 % recyklovaných polyesterových a 15 % bikomponentních vláken $0,053 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ s obsahem vlhkosti 7,4 % hm. Na základě provedených poznatků lze říci, že u tepelně i akusticko izolačních materiálů ze syntetických vláken nemá vlhkost příliš velký vliv na tepelně izolační vlastnosti. Množství vlhkosti v těchto materiálech se pohybovalo do 1 % hm. Naopak u přírodních materiálů s obsahem odpadní bavlny nebo lnu vlivem vyšší sorpční vlhkosti dochází k degradaci tepelně izolačních vlastností. Dalším faktorem, který ovlivňuje součinitele tepelné vodivosti, je objemová hmotnost. Hodnota optimální objemové hmotnosti je klíčovým parametrem pro dosažení nejnižší hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Optimální objemová hmotnost tepelně i akusticko izolačních materiálů je v rozmezí $40 - 65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

V rámci akustických vlastností bylo dosaženo výborných výsledků. Všechny zkušební sady dosáhly nízkých hodnot dynamické tuhosti a byly zaříděny dle normy do I. kategorie podložky. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u zkušebních sad 5 a 11, složených z 85 % polyesterovými a 15 % bikomponentními vlákny. Kromě nízké dynamické tuhosti se tyto sady vzorků vyznačovaly i nejvyššími tloušťkami a objemovou hmotností. Tepelně i akusticko izolačních materiálů ze sady 5 a 11 o uvedených parametrech a složení by bylo možné použít jako izolace podlah proti kročejovému hluku. V oblasti zvukové pohltivosti byly zkoušené materiály zařazeny dle normy do kategorie C a D. Nejvyšší hodnota váženého činitele zvukové pohltivosti byla naměřena 0,7 u zkušební sady 5 o složení 85 % polyesterových a 15 % bikomponentních vláken. U vzorků z této sady byla naměřena rovněž největší tloušťka a nejvyšší objemová hmotnost. Provedené měření potvrdilo závislost činitele zvukové pohltivosti na tloušťce a objemové hmotnosti analyzovaného akusticko izolačního materiálu. Čím vyšší je hodnota váženého činitele zvukové pohltivosti, tím lépe materiál pohlcuje zvuk. Vzhledem k poměrně vysokým hodnotám váženého činitele zvukové pohltivosti jsou zkoumané materiály dobrými akustickými izolacemi. Nejlepších akustických vlastností dosahují materiály s podílem bavlny.

Zkoušené tepelně i akusticko izolační materiály byly vyvinuty za účelem použití ve svislých vnitřních i obvodových konstrukcích jako výplňová izolace. Z tohoto důvodu byly mechanické vlastnosti zkušebních sad vzorků zjišťovány pouze orientačně. Se zvyšujícím množstvím vláken roste objemová hmotnost. Větší množství vláken ve struktuře zajišťuje lepší propojení mezi vlákny při výrobě izolanů. Z toho je patrné, že s vyšší objemovou hmotností roste i hodnota pevnosti v tahu kolmo k rovině desky a napětí při 10% deformaci. S ohledem na použití těchto materiálů není kladen tak velký důraz na pevnosti, stačí dostatečná odolnost vůči zatížení vlastní tíhou.

Tepelně i akusticko izolační materiály z odpadních textilních vláken jsou cenově výhodné. Jejich cena odpovídá množství a druhu použitých vláken. Čím je vláknitý materiál hutnější, tím vyšší je jeho objemová hmotnost, množství vláken ve struktuře i jeho cena. Ve srovnání s vláknitými izolacemi na bázi skelných a čedičových vláken, za srovnatelné hodnoty součinitele tepelné vodivosti i objemové hmotnosti, jsou výrazně levnější izolanty z odpadních textilních vláken. Z výše uvedeného vyplývá, že izolanty vyrobené z odpadních textilních vláken mohou konkurovat materiálům běžně dostupným na trhu. Jejich značnou nevýhodou oproti izolanům na bázi minerálních vláken může být reakce na oheň, která by mohla být předmětem pro další výzkum tepelně i akusticko izolačních materiálů z odpadních textilních vláken.

Jako nevýhoda materiálů na bázi přírodních vláken se jeví jejich citlivost k vlhkosti vedoucí ke zvýšení hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Řešením by mohla být impregnace bavlněných a lněných vláken, která by však pravděpodobně navýšila výslednou cenu materiálu. Proto se jeví jako jednodušší varianta použití v rámci konstrukce, kde je zamezeno přístupu vlhkosti např. jako výplňová izolace ve svislých vnitřních i obvodových konstrukcích, do podhledů nebo mezi krokve zateplených střešních konstrukcí. Dalším řešením může být použití syntetických odpadních vláken, které nejsou tolik citlivé na vlhkost a nedochází u nich k degradaci tepelně izolačních vlastností. Na závěr lze konstatovat, že se jedná o materiály s výbornými tepelně i akusticko izolačními vlastnostmi, které jsou přínosné vzhledem k využití odpadních surovin pro ochranu životního prostředí a částečným řešením ekonomického a udržitelného rozvoje.

14 Použitá literatura

- [1] BRIGA-SÁ, A., D. NASCIMENTO, N. TEIXEIRA, J. PINTO, F. CALDEIRA, H. VARUM a A. PAIVA. *Construction and Building Materials: Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution* [online]. 2013, pages 155-160 [cit. 2016-11-09]. ISSN 0950-061.
- [2] HADDED, Abderrazak, Sofien BENLTOUFA, Faten FAYALA a Abdelmajid JEMNI. *Journal of Building Engineering: Thermo physical characterisation of recycled textile materials used for building insulating* [online]. Laboratory of Thermal and Energetic System Study (LESTE), National Engineering School of Monastir, Monastir University, Tunisia, 2016, 34-40 [cit. 2016-12-12].
- [3] *Odpady* [online]. [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/1ZOZP/odpady/odpady1.htm>
- [4] Předcházení vzniku odpadů a nakládání s nimi. *Evropská komise: Životní prostředí* [online]. [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/environment/basics/green-economy/managing-waste/index_cs.htm
- [5] Rámcová směrnice EU o odpadech/hierarchie. *Odpad je energie* [online]. [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <http://www.odpadjeenergie.cz/legislativa/ramcova-smernice-eu-o-odpadech-hierarchie>
- [6] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES)*. In: . ročník 2008, číslo 98. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>
- [7] Waste. *Environment* [online]. [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm>
- [8] *Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů*. In: . 2001, číslo 185. Dostupné také z: <http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/8fc3e5c15334ab9dc125727b00339581?OpenDocument>
- [9] ČSN 80 1900. *Textilní odpady: Základní názvosloví*. Praha: ÚNZM, 1984.
- [10] HRŮZA, Jakub. *Zpracování odpadů textilních a polymerních: Textilní způsob zpracování* [online]. Katedra netkaných textilí, Fakulta textilní, Technická univerzita v Liberci [cit. 2016-11-09].

- [11] Recyklace starého textilu: Sběr a recyklace textilních odpadů. *Ecoservis: komplexní nakládání s odpady* [online]. [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <http://www.ecoservis.eu/recyklace-stareho-textilu>
- [12] Textil. *Třídění odpadu* [online]. [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <http://www.trideniodpadu.cz/textil>
- [13] KEPÁK, František. *Průmyslové odpady* [online]. 2. Ústí nad Labem: Fakulta životního prostředí UJEP, 2005, 200 s. [cit. 2016-10-30]. skripta. ISBN 978-80-7414-228-4. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/1ODP1/Prumyslove_odpady_1-cast.pdf
- [14] PAIVA, Anabela, Humberto VARUM, Fernando CALDEIRA, Ana SÁ, David NASCIMENTO a Nuno TEIXEIRA. *Textile Subwaste as a Thermal Insulation Building Material* [online]. Portugal: International Conference on Petroleum and Sustainable Development, ACSIT Press, Singapore, 2011 [cit. 2016-12-12].
- [15] *Resources, Conservation and Recycling: Environmental impact of Recover cotton in textile industry* [online]. Department of Analytical Chemistry, University of Valencia, 50th Dr. Moliner St., 46100 Burjassot, Spain, 2016, 107-115 [cit. 2016-12-12].
- [16] Komunální odpad. *Třídění odpadu* [online]. [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: <http://www.trideniodpadu.cz/komunalni-odpad>
- [17] *Studijní materiály: Rostlinná vlákna* [online]. In: . Fakulta textilní, Technická univerzita v Liberci, 2013 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: www.kmi.tul.cz/studijni_materialy/data/2013-10-04/08-12-52.pdf
- [18] CHYBÍK, Josef. *Přírodní stavební materiály*. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, 2009, 268 s. ISBN 978-80-247-2532-1.
- [19] *Studijní podklady: Přírodní rostlinná vlákna* [online]. In: . Katedra materiálu, Technická univerzita v Liberci [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/./prirodni%20rostlinna%20vlakna.ppt
- [20] Vlákna z keratinu: vlna ovčí. *Vlákna, příze a nitě* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.skolertextilu.cz/elearning/462/textilni-terminologie-zboziznalstvi/vlakna-prize-a-nite/Vlakna-zkeratinu:-vlna-ovci.html>
- [21] Chemická vlákna. *Vlákna, příze a nitě* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.skolertextilu.cz/elearning/465/textilni-terminologie-zboziznalstvi/vlakna-prize-a-nite/Chemicka-vlakna.html>

- [22] *Studijní materiály: Vlákná z přírodních polymerů* [online]. In: . Katedra materiálového inženýrství, Fakulta textilní, Technická univerzita v Liberci [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: http://www.kmi.tul.cz/studijni_materialy/data/2013-10-04/08-13-49.pdf
- [23] *Studijní materiály: Syntetická vlákna* [online]. In: . Katedra materiálového inženýrství, Fakulta textilní, Technická univerzita v Liberci [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: http://www.kmi.tul.cz/studijni_materialy/data/2013-10-04/08-14-03.pdf
- [24] Polyamidová vlákna. In: *Vlákná, příze a nitě* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/elearning/466/textilni-terminologie-zboziznalstvi/vlakna-prize-a-nite/Polyamidova-vlakna.html>
- [25] Tesil. In: *SILON* [online]. [cit. 2016-12-23]. Dostupné z: <http://www.silon.eu/cz/produkty/tesil/charakteristika-3/>
- [26] JIRSÁK, Oldřich a Klára KALINOVÁ. *Netkané textilie* [online]. Fakulta textilní, Technická univerzita v Liberci, 130 s. [cit. 2016-12-23].
- [27] High Air Tech for isotropic web formation. In: *Trützschler Nonwovens* [online]. [cit. 2016-12-23]. Dostupné z: <http://www.truetzschler-nonwovens.com/en/products/web-forming/airlay/>
- [28] Technology. In: *Struto* [online]. [cit. 2016-12-23]. Dostupné z: <http://www.struto.com/technology.htm>
- [29] Technologie Struto. In: *Jilana* [online]. [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://www.jilana.cz/about/technologie.html>
- [30] ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov. Část 2: Funkční požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [31] *Materiály pro tepelné izolace I: Třídění tepelně izolačních materiálů* [online]. In: . [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: [http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaskaVIII_IZMA\(1\).pdf](http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaskaVIII_IZMA(1).pdf)
- [32] STANISLAV, Šťastník a Zach JIŘÍ. *Zkoušení izolačních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, 2002, 95 s. ISBN 80-214-2253-X.
- [33] Vyhláška č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby. In: *Sbírka zákonů*. 2009.
- [34] Zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů. In: *Sbírka zákonů*. 2000.

- [35] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. In: *Sbírka zákonů*. 2011.
- [36] Vyhláška č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby. In: *Sbírka zákonů*. 2009.
- [37] ČSN 73 0532. *Akustika - Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních výrobků - Požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [38] ČSN 73 0540-3. *Tepelná ochrana budov. Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [39] ČSN ISO 10534-2. *Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích - Část 2: Metoda přenosové funkce*. Praha: ÚNMZ, 2000.
- [40] ČSN EN ISO 11654. *Akustika - Absorbéry zvuku používané v budovách - Hodnocení zvukové pohltivosti*. Praha: ÚNMZ, 1998.
- [41] STANISLAV, Šťastník a Zach JIŘÍ. *Stavební akustika a zvukoizolační materiály*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, 2002, 209 s. ISBN 80-214-2117-7.
- [42] ČSN EN 1607. *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky*. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [43] ČSN EN 826. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Zkouška tlakem*. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [44] ČSN EN 822. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení délky a šířky*. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [45] ČSN EN 12085. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení lineárních rozměrů zkušebních vzorků*. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [46] ČSN EN 823. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení tloušťky*. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [47] ČSN EN 1602. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení objemové hmotnosti*. Praha: ÚNMZ, 1998.
- [48] ČSN 72 7012-3. *Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 3: Metoda měřidla tepelného toku*. Praha: ÚNMZ, 1994.

- [49] ČSN EN 12667. *Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku - Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu*. Praha: ÚNMZ, 2001.
- [50] ISO 8301 Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties: Heat flow meter apparatus. 1991.
- [51] ČSN EN ISO 12571. *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení hygroskopických sorpčních vlastností*. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [52] ČSN ISO 9052-1. *Akustika. Stanovení dynamické tuhosti. Část 1: Materiály pro izolaci plovoucích podlah v bytových objektech*. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1992.

15 Seznam příloh

15.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Průřez zvlákňovací hubicí pro výrobu bikomponentních vláken typu jádro-plášť – 1 přívod polymeru (jádro), 2 přívod polymeru (plášť), 3 – vznikající bikomponentní vlákno	29
Obrázek 2: Typické tvary příčných řezů bikomponentních vláken.....	29
Obrázek 3: Vpichovací zařízení – 1 příváděcí dopravník, 2 vlákenná vrstva, 3 stěrací rošt, 4 opěrný rošt, 5 jehelní deska, 6 jehly, 7 odváděcí válce.	31
Obrázek 4: Označení zkušebních vzorků	44
Obrázek 5: Digitální číselníkový úchylkoměr s dotykovou deskou pro měření tloušťky zkušebních vzorků	46
Obrázek 6: Přístroj Lambda 2300, Holometrix Micromet pro stanovení součinitele tepelné vodivosti	47
Obrázek 7: Klimatizační komora.....	48
Obrázek 8: Akustický interferometr	50
Obrázek 9: Měřicí aparatura pro stanovení dynamické tuhosti materiálu.....	52
Obrázek 10: Zkušební vzorek upevněný ve zkušebním lisu před zkouškou pevnosti v tahu kolmo k rovině desky	53
Obrázek 11: Měřicí sestava pro stanovení napětí při 10% deformaci	55

15.2 Seznam tabulek

Tabulka 1: Navržené receptury izolačních materiálů	44
Tabulka 2: Třída zvukové pohltivosti dle normy ČSN EN ISO 11654 [40]	49
Tabulka 3: Kategorie podložky podle dynamické tuhosti dle ČSN 73 0532 [37].....	51
Tabulka 4: Hodnocení významnosti jednotlivých kritérií	56
Tabulka 5: Stanovení příčných rozměrů a tloušťky zkušebních vzorků	57
Tabulka 6: Stanovení objemové hmotnosti zkušebních vzorků	60
Tabulka 7: Stanovení součinitele tepelné vodivosti zkušebních vzorků ve vysušeném, vzduchosuchém a vlhkém stavu	63
Tabulka 8: Stanovení váženého činitele zvukové pohltivosti zkušebních vzorků a zařazení do třídy zvukové pohltivosti dle ČSN EN ISO 11654	65
Tabulka 9: Stanovení dynamické tuhosti zkušebních vzorků a zařazení do kategorie podložky dle ČSN 73 0532.....	66
Tabulka 10: Stanovení pevnosti kolmo k rovině desky na zkušebních vzorcích	67
Tabulka 11: Stanovení napětí při 10% deformaci na zkušebních vzorcích.....	68
Tabulka 12: Druhy a ceny vláken použité při výrobě zkušebních vzorků	70
Tabulka 13: Ceny zkoumaných materiálů na bázi textilních vláken.....	70
Tabulka 14: Ceny běžně dostupných vláknitých tepelně izolačních materiálů na trhu.....	71
Tabulka 15: Hodnotící kritéria a požadavky na jejich optimum	72

Tabulka 16: Rozhodovací matice z parametry zkoušených materiálů	72
Tabulka 17: Sattyho matice	72
Tabulka 18: Výpočtová matice tepelně i akusticko izolačních materiálů z textilních vláken pro aplikaci jako výplňové izolace ve vnitřních nebo obvodových konstrukcích.....	73

15.3 Seznam grafů

Graf 1: Přehled tloušťek izolačních materiálů	59
Graf 2: Přehled objemových hmotností izolačních materiálů	62
Graf 3: Přehled hodnot součinitele tepelné vodivosti izolačních materiálů ve vysušeném, vzduchosuchém a vlhkém stavu	64
Graf 4: Sorpční izotermny - závislost vlhkosti izolačních materiálů na relativní vlhkosti prostředí.....	64
Graf 5: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci.....	65
Graf 6: Přehled dynamických tuhostí izolačních materiálů	67
Graf 7: Přehled pevností v tahu kolmo k rovině desky izolačních materiálů.....	68
Graf 8: Přehled napětí při 10% deformaci izolačních materiálů	69
Graf 9: Přehled cen izolačních materiálů	71
Graf 10: Poměrná změna součinitele tepelné vodivosti při zvýšené vlhkosti	75
Graf 11: Závislost součinitele tepelné vodivosti na sorpční vlhkosti v izolačních materiálech na bázi textilních vláken	76
Graf 12: Závislost součinitele tepelné vodivosti ve vysušeném stavu na objemové hmotnosti izolačních materiálů na bázi textilních vláken	76

16 Přílohy

Příloha 1: Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla dle ČSN 73 0540-2

Popis konstrukce	Součinitel prostupu tepla [W·m ⁻² ·K ⁻¹]		
	Požadované hodnoty	Doporučené hodnoty	Doporučené hodnoty pro pasivní budovy
	U _{N,20}	U _{rec,20}	U _{pas,20}
Stěna vnější	0,30 ¹⁾	těžká: 0,25 lehká: 0,20	0,18 až 0,12
Střecha strmá se sklonem nad 45°	0,3	0,2	0,18 až 0,12
Střecha plochá a šikmá se sklonem do 45° včetně	0,24	0,16	0,15 až 0,10
Strop s podlahou nad venkovním prostorem	0,24	0,16	0,15 až 0,10
Strop pod nevytápěnou půdou (se střechou bez tepelné izolace)	0,3	0,2	0,15 až 0,10
Stěna k nevytápěné půdě (se střechou bez tepelné izolace)	0,30 ¹⁾	těžké: 0,25 lehké: 0,20	0,18 až 0,12
Podlaha a stěna vytápěného prostoru přilehlá k zemině ^{4), 6)}	0,45	0,3	0,22 až 0,15
Strop a stěna vnitřní z vytápěného k nevytápěnému prostoru	0,6	0,4	0,30 až 0,20
Strop a stěna vnitřní z vytápěného k temperovanému prostoru	0,75	0,5	0,38 až 0,25
Strop a stěna vnější z temperovaného prostoru k venkovnímu prostředí	0,75	0,5	0,38 až 0,25
Podlaha a stěna částečně vytápěného prostoru přilehlá k zemině ⁶⁾	0,85	0,6	0,45 až 0,30
Stěna mezi sousedními budovami ³⁾	1,05	0,7	0,5
Strop mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně	1,05	0,7	
Stěna mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně	1,3	0,9	
Strop vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5 °C včetně	2,2	1,45	
Stěna vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5 °C včetně	2,7	1,8	
Výplň otvoru ve vnější stěně a strmé střeše, z vytápěného prostoru do venkovního prostředí, kromě dveří	1,5 ²⁾	1,2	0,8 až 0,6
Šikmá výplň otvoru se sklonem do 45°, z vytápěného prostoru do venkovního prostředí	1,4 ⁷⁾	1,1	0,9
Dveřní výplň otvoru z vytápěného prostoru do venkovního prostředí (včetně rámu)	1,7	1,2	0,9
Výplň otvoru vedoucí z vytápěného do temperovaného prostoru	3,5	2,3	1,7
Výplň otvoru vedoucí z temperovaného prostoru do venkovního prostředí	3,5	2,3	1,7
Šikmá výplň otvoru se sklonem do 45° vedoucí z temperovaného prostoru do venkovního prostředí	2,6	1,7	1,4

Popis konstrukce		Součinitel prostupu tepla [W·m ⁻² ·K ⁻¹]		
		Požadované hodnoty	Doporučené hodnoty	Doporučené hodnoty pro pasivní budovy
		U _{N,20}	U _{rec,20}	U _{pas,20}
<p>Lehký obvodový plášť (LOP), hodnocený jako smontovaná sestava včetně nosných prvků, s poměrnou plochou průsvitné výplně otvoru</p> $f_w = A_w / A, \text{ v m}^2/\text{m}^2,$ <p>kde</p> <p>A je celková plocha lehkého obvodového pláště (LOP), v m²;</p> <p>A_w plocha průsvitné výplně otvoru včetně příslušných částí rámu v LOP, v m².</p>	<p>$f_w \leq 0,5$</p> <p>$f_w > 0,5$</p>	<p>$0,3 + 1,4 \cdot f_w$</p> <p>$0,7 + 0,6 \cdot f_w$</p>	<p>$0,2 + f_w$</p>	<p>$0,15 + 0,85 \cdot f_w$</p>
Kovový rám výplně otvoru		-	1,8	1
Nekovový rám výplně otvoru ⁵⁾		-	1,3	0,9 – 0,7
Rám lehkého obvodového pláště		-	1,8	1,2
POZNÁMKY <p>¹⁾ Pro jednovrstvé zdivo se nejpozději do 31.12.2012 připouští hodnota 0,38 W·m⁻²K⁻¹.</p> <p>²⁾ Nejpozději do 31.12.2012 se připouští hodnota 1,7 W·m⁻²K⁻¹.</p> <p>³⁾ Nemusí se vždy jednat o teplosměnnou plochu, ovšem s ohledem na postup výstavby a možné změny způsobu užívání se zajišťuje tepelné ochrana na uvedené úrovni.</p> <p>⁴⁾ V případě podlahového a stěnového vytápění se do hodnoty součinitele prostupu tepla započítávají pouze vrstvy od roviny, ve které je umístěno vytápění, směrem do exteriéru.</p> <p>⁵⁾ Platí i pro rámy využívající kombinace materiálů, včetně kovových, jako jsou například dřevo-hliníkové rámy.</p> <p>⁶⁾ Odpovídá výpočtu součinitele prostupu tepla podle ČSN 73 0540-4, (tj. bez vlivu zeminy), nikoli výslednému působení podle ČSN EN ISO 13370.</p> <p>⁷⁾ Nejpozději do 31.12.2012 se připouští hodnota 1,5 W·m⁻²K⁻¹.</p>				

Příloha 2: Požadavky na zvukovou izolaci v místnostech dle ČSN 73 0532

Č.	Hlučný prostor (místnost zdroje zvuku)	Požadavky na zvukovou izolaci			
		Stropy		Stěny	Dveře
		$R'_{w, D_{nT,w}}$	$L'_{n,w}, L'_{nT,w}$	$R'_{w, D_{nT,w}}$	R_w
		[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
A. Bytové domy, rodinné domy – nejméně jedna obytná místnost bytu					
1	Všechny ostatní obytné místnosti téhož bytu	47	63	42	27
B. Bytové domy – obytné místnosti bytu					
2	Všechny místnosti druhých bytů, včetně příslušenství	53 52 ¹⁾	55 58 ¹⁾	53 52 ¹⁾	-
3	Společné prostory domu (schodiště, chodby, terasy, kočárkárny, sušárny, sklípky apod.)	52	55	52	32 ²⁾ 37 ³⁾
4	Průjezdy, podjezdy, garáže, průchody, podchody	57	48	57	-
5	Místnosti s technickým zařízením domu (výměníkové stanice, kotelny, strojovny výtahů, strojovny VZT, prádelny apod.) s hlukem: $L_{A,max} \leq 80$ dB $80 < L_{A,max} \leq 85$ dB	 57 ⁴⁾ 62 ⁵⁾	 48 ⁴⁾ 48 ⁵⁾	 57 ⁴⁾ 62 ⁵⁾	-
6	Provozovny s hlukem $L_{A,max} \leq 85$ dB: s provozem nejvýše do 22:00 h s provozem i po 22:00 h	 57 62	 53 48	 57 62	-
7	Provozovny s hlukem $85 < L_{A,max} \leq 95$ dB s provozem i po 22:00 h	72 ⁵⁾	38 ⁵⁾	-	-
C. Terasové nebo řadové domy a dvojdomy – obytné místnosti bytu					
8	Všechny místnosti v sousedním domě	57	48	57	-
D. Hotely a zařízení pro přechodné ubytování – ložnicový prostor ubytovací jednotky					
9	Všechny místnosti druhých jednotek	52	58	47	42 ⁶⁾
10	Společně užívané prostory (chodby, schodiště)	52	58	45	32 27 ⁷⁾
11	Restaurace a jiné provozovny s provozem do 22:00 h	57	53	57	-
12	Restaurace a jiné provozovny s provozem i po 22:00h ($L_{A,max} \leq 85$ dB)	62	48	62	-

Č.	Hlučný prostor (místnost zdroje zvuku)	Požadavky na zvukovou izolaci			
		Stropy		Stěny	Dveře
		$R'_{w}, D_{nT,w}$	$L'_{n,w}, L'_{nT,w}$	$R'_{w}, D_{nT,w}$	R_w
		[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
E. Nemocnice, zdravotnická zařízení – lůžkové pokoje, ordinace, pokoje lékařů, operační sály apod.					
13	Lůžkové pokoje, ordinace, ošetrovny, operační sály, komunikační a pomocné prostory (chodby, schodiště)	52	58	47 ⁸⁾	27
14	Hlučné prostory (kuchyně, technická zařízení budovy) $L_{A,max} \leq 85$ dB	62	48	62	-
F. Školy a vzdělávací instituce – učebny, výukové prostory					
15	Učebny, výukové prostory	52	58	47	-
16	Společné prostory, chodby, schodiště	52	58	47	32 27 ⁷⁾
17	Hlučné prostory (dílny, jídelny) $L_{A,max} \leq 85$ dB	55	48	52	-
18	Velmi hlučné prostory (hudební učebny, dílny, tělocvičny) $L_{A,max} \leq 90$ dB	60 ⁹⁾	48 ⁹⁾	57 ⁹⁾	-
G. Administrativní a správní budovy, firmy – kanceláře a pracovny					
19	Kanceláře a pracovny s běžnou administrativní činností, chodby, pomocné prostory	47	63	37	27
20	Kanceláře a pracovny se zvýšenými nároky, pracovny vedoucích pracovníků ¹⁰⁾	52	58	45	32
21	Kanceláře a pracovny pro důvěrná jednání nebo jiné činnosti vyžadující vysokou ochranu před hlukem ¹⁰⁾	52	58	50	37

VYSVĚTLIVKY

- ¹⁾ Požadavek se vztahuje pouze na starou, zejména panelovou výstavbu, pokud neumožňuje dodatečná zvukově izolační opatření.
- ²⁾ Platí pro vstupní dveře z chodby do předsíně (vstupní haly) bytu, je-li chráněný prostor místností oddělen dalšími dveřmi.
- ³⁾ Platí pro vstupní dveře z chodby přímo do chráněné obytné místnosti bytu.

- ⁴⁾ Kromě splnění stanovených požadavků na vzduchovou a kročejovou neprůzvučnost mohou být nutná další opatření, kdy je nutné stroje a zařízení uložit, zavěsit či upravit tak, aby nedocházelo k šíření a přenosu zvuku konstrukcí (vibracemi) a instalacemi (rozvody médií, šachtami aj.) a k překročení hygienických limitů hluku ve vnitřních chráněných prostorech. V prokázaných případech, kdy zařízení nebude zdrojem hluku a vibrací, lze požadavky snížit o 5 dB. V opodstatněných případech se doporučuje provést předběžné posouzení pomocí akustické studie.
- ⁵⁾ Kromě splnění stanovených požadavků na vzduchovou a kročejovou neprůzvučnost mohou být nutná další opatření, kdy je nutné stroje a zařízení uložit, zavěsit či upravit tak, aby nedocházelo k šíření a přenosu zvuku konstrukcí (vibracemi) a instalacemi (rozvody médií, šachtami aj.) a k překročení hygienických limitů hluku ve vnitřních chráněných prostorech. Místnosti s provozním hlukem s dominantním obsahem nízkých kmitočtů nebo s tónovými složkami (např. hlučné strojovny, diskotéky apod.) se zásadně nedoporučuje situovat do blízkosti bytových jednotek. Zejména přenos nízkých kmitočtů nelze v běžných obytných budovách účinně omezit. V odůvodněných případech se doporučuje provést předběžné posouzení pomocí akustické studie. Provozovny s hlukem $L_{Amax} > 95$ dB se nemají umisťovat do obytných budov.
- ⁶⁾ Platí pro spojovací dveře mezi samostatnými ubytovacími jednotkami (např. dvojité nebo zádveří).
- ⁷⁾ Platí pro vstupní dveře, je-li chráněný prostor oddělen předsíní nebo zádveřím s dalšími dveřmi.
- ⁸⁾ U stěn s prosklenými částmi, přes které je nutný vizuální kontakt lze požadavek snížit o 5 dB a u celoplošných zasklení až o 10 dB (např. operační sály, JIP).
- ⁹⁾ Vzhledem k možnému přenosu nízkých kmitočtů mohou být nutná další opatření. Situace obvykle vyžaduje individuální posouzení.
- ¹⁰⁾ Požadavky platí rovněž mezi uvedenými pracovnými a přilehlými chodbami, popř. pomocnými prostory.